

Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur  
Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

**Teilstudie**  
**„Brennstoffzellen-Lkw: kritische**  
**Entwicklungshemmnisse,**  
**Forschungsbedarf und**  
**Marktpotential“**

**Autorinnen und Autoren**

**Fraunhofer ISI**

Dr. Till Gnann, Prof. Dr. Martin Wietschel,  
Dr. André Kühn, Dr. Axel Thielmann, Andreas Sauer,  
Dr. Patrick Plötz, Cornelius Moll

**Fraunhofer IML**

Dr. Sebastian Stütz, Maximilian Schellert,  
David Rüdiger

**PTV Transport Consult GmbH**

Dr.-Ing. Volker Waßmuth, Daniela Paufler-Mann

---

## Kontakt

### **Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI)**

Breslauer Str. 48

76139 Karlsruhe, Germany

<http://www.isi.fraunhofer.de>

Dr. Till Gnann

Tel.: +49 721 6809-460

[till.gnann@isi.fraunhofer.de](mailto:till.gnann@isi.fraunhofer.de)

#### Zitationsweise:

Gnann, T.; Wietschel, M.; Kühn, A.; Thielmann, A.; Sauer, A; Plötz, P.; Moll, C.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.: „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“, Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Karlsruhe, 2017.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>7</b>
1.1 <i>Ausgangslage und Problemstellung.....</i>	7
1.2 <i>Zielsetzung und Vorgehensweise .....</i>	9
<b>2 Nationaler und internationaler Forschungs- und Entwicklungsstand bei BZ-Lkw .....</b>	<b>11</b>
2.1 <i>Quantitative Analyse – Publikationen und Patente zu Brennstoffzellen in Nutzfahrzeugen.....</i>	11
2.1.1 Publikationsanalysen.....	12
2.1.2 Patentanalysen.....	15
2.1.3 Unterschiede zwischen den Bereichen Lkw und Busse.....	19
2.1.4 Spezialisierung der Länder.....	21
2.2 <i>Qualitative Analyse – Experteninterviews und Studien zum Forschungsstand von BZ-Lkw.....</i>	25
2.2.1 Stand der Technik .....	27
2.2.2 FuE-Herausforderungen.....	30
2.2.3 Aktivitäten in Industrie und Politik nach Ländern .....	34
2.2.4 Stärken und Schwächen der der Länder.....	44
2.3 <i>Fazit zum Stand der Forschung und Entwicklung von BZ-Lkw.....</i>	47
<b>3 Marktpotential.....</b>	<b>51</b>
3.1 <i>Methodik.....</i>	51
3.1.1 Übersicht .....	51
3.1.2 TCO-Berechnung .....	52
3.1.3 Beschränkte Modellverfügbarkeit.....	54
3.1.4 Berechnung der Kosten für THG-Emissionen.....	55
3.1.5 Besonderheiten HO-Lkw sowie BEV und PHEV-Fahrzeuge .....	56
3.2 <i>Ergebnisse.....</i>	56
3.2.1 Annahmen und Szenarien.....	57
3.2.2 Markthochlauf bis 2030 (Basisszenario) .....	60
3.2.3 Sensitivitäten und Variationsrechnungen.....	66
3.2.4 Diskussion der Ergebnisse.....	75
3.2.5 Zusammenfassung der Markthochlaufergebnisse .....	77
<b>4 Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>79</b>
4.1 <i>Externe Einflussfaktoren.....</i>	79

4.1.1	Konkurrenztechnologien.....	79
4.1.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	80
4.2	<i>Spillover-Effekte aus der Pkw- und Busentwicklung.....</i>	<i>81</i>
4.3	<i>Spezielle Anforderungen für BZ-Lkw.....</i>	<i>83</i>
4.3.1	Einfluss von Wirkungsgraden auf TCO .....	83
4.3.2	Einfluss der Betankung .....	84
4.3.3	Zuverlässigkeit der BZ-Lkw .....	85
4.4	<i>Spezielle Anforderungen für große Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht über 12 Tonnen .....</i>	<i>86</i>
4.4.1	Mobile Speicherung von Wasserstoff.....	86
4.4.2	Motorleistung bei großen Lkw .....	88
4.4.3	Reale Anforderungen an BZ-Lkw .....	89
4.5	<i>FuE-Bedarf für BZ-Lkw .....</i>	<i>92</i>
<b>5</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>95</b>
5.1	<i>Anhang – Interviewte Expertinnen und Experten .....</i>	<i>95</i>
5.2	<i>Verwendete Parameter .....</i>	<i>96</i>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>107</b>

## Zusammenfassung

### Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Brennstoffzellen(BZ)-Technologie stellt eine Option zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen und zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor dar. Sowohl bei Pkw als auch bei Stadtbussen gab es in der Vergangenheit eine Vielzahl von BZ-Demonstrationsprojekten; die BZ-Pkw stehen kurz vor der Serienreife. Sowohl die Anzahl der Demonstrationsprojekte als auch die FuE-Aufwendungen sind bei BZ-Lkw hingegen im Moment noch deutlich geringer.

Die Brennstoffzelle spielt in der Anwendung bei Lkw in zwei Bereichen eine Rolle: Zum einen bei der Onboard-Stromversorgung (engl. „Auxiliary Power Unit“, APU), u. a. zur Reduktion von Lärm oder lokalen Schadstoffen, zum anderen zur Elektrifizierung des Antriebstrangs. Während die APU bisher häufig im Fokus von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben stand (u. a. bei der Förderung im „Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“), ist die BZ als Fahrtrieb für Lkw bisher wenig erforscht.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung der „Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS)“ wurde daher in der vorliegenden Studie untersucht, welche Forschungs- und Entwicklungs (FuE)-Bedarfe bei BZ-Lkw bestehen. Der Fokus liegt dabei auf dem Einsatz als Fahrtrieb und auf konkreten Handlungsempfehlungen für Wissenschaft, Politik und Wirtschaft. Auf Basis von Markt- und Technologieanalysen sowie Expertenbefragungen wurden zentrale FuE-Bedarfe für den BZ-Lkw identifiziert, die im Rahmen eines Expertenworkshops hinterfragt und erweitert wurden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen dargestellt.

### Hintergrund und Synergieeffekte aus dem Pkw-Bereich

*Die FuE-Aktivitäten bei BZ im Lkw-Bereich liegen deutlich hinter denen im Pkw-Bereich.*

BZ-Lkw sind laut der befragten Expertinnen und Experten vom Stand ihrer Forschung heute ungefähr auf dem Entwicklungsstand zu verorten, wo BZ-Pkw vor zehn bis fünfzehn Jahren standen. Dabei ist nicht nur die BZ an sich gemeint, sondern vielmehr die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Lkw allgemein, wo sich entsprechende Fahrzeughersteller noch nicht klar positionieren oder engagieren.

Die derzeitige Forschungsaktivität in der BZ-Technologie variiert zwischen den einzelnen Ländern. Neben den USA und Deutschland nehmen China und Japan eine führende Rolle bei den FuE-Aktivitäten ein. Während in den USA und in Deutschland die Anzahl der Publikationen über BZ-Lkw stagnieren, stieg diese besonders in China in den letzten Jahren an. Die Anzahl der angemeldeten Patente im Kontext von BZ-Lkw als zweiter Indikator für die FuE-Intensität weist ebenfalls in China und Japan ein Wachstum auf. Im Gegensatz zu den asiatischen Ländern existieren in Deutschland und den USA bereits einzelne öf-

fentlich geförderte Projekte zur Demonstration der Technologie, was als Hinweis darauf gewertet werden kann, dass das politische Interesse in diesen Ländern höher ist als im Rest der Welt. Insgesamt fokussieren sich in allen Ländern sowohl Publikationen als auch Patente auf die BZ-Anwendung in Pkw gefolgt von Stadtbussen.

*Das Marktpotential von BZ-Lkw ist abhängig von der Konkurrenz durch andere Antriebs-technologien.*

Trotz der technologischen Einschränkungen ergibt sich in einem Gesamtnutzungskosten-basierten (engl. „Total Cost of Ownership (TCO)“) Technologiewahlmodell für Lkw mit bis zu zwölf Tonnen zulässigem Gesamtgewicht (zGG) ein Marktpotential im Bestand bis zum Jahr 2030 von etwa 2 bis 3 %. Lkw über 12 Tonnen zGG fahren deutlich mehr als Lkw unter 12 Tonnen zGG. Daher müssen die Tanks für schwere Lkw überproportional größer dimensioniert sein. Mit wachsender Tankgröße steigen die Nutzlast-/Nutzvolumenverluste, daher scheint der Einsatz von BZ in schweren Lkw basierend auf dem derzeitigen Forschungsstand weniger wahrscheinlich. Neben den technologischen Restriktionen sind für die Diffusion des BZ-Lkw jedoch die Entwicklungen bei den Konkurrenztechnologien maßgeblich. Besonders gasbetriebene Lkw (CNG, LNG) weisen ähnlich hohe TCO auf und stehen somit in direktem Wettbewerb mit den BZ-Lkw. Entscheidend für den Erfolg des BZ-Lkw ist demnach die zukünftige Entwicklung der Energieträgerpreise, insbesondere für Wasserstoff, Erdgas und Diesel sowie das Ambitionsniveau beim Klimaschutz. Diese werden in nicht unerheblichem Maße durch Steuern und Abgaben beeinflusst.

Die FuE-Fortschritte im Pkw unterstützen den Einsatz im Lkw-Bereich. Beim Einsatz der BZ in Pkw stehen vor allem die Herstellungskosten der BZ und des Wasserstofftanks, die Lebensdauer, die Zuverlässigkeit, die Sicherheit und die Kaltstartfähigkeit des BZ-Systems sowie Aspekte der Standardisierung und des BZ-Tankstellenaufbaus im Mittelpunkt der FuE-Aktivitäten. Diese Aspekte sind auch für den Lkw-Bereich relevant, und Synergieeffekte sollten genutzt werden.

Wegen der verhältnismäßig geringen Stückzahlen im Vergleich zum Pkw-Massenmarkt dürfte der Lkw-Markt vom Durchbruch der BZ-Technologie im Pkw abhängen. Es ist zu erwarten, dass die Verfügbarkeit preisgünstiger Niedertemperatur-BZ-Systeme und eine wachsende Wasserstoffinfrastruktur die Entwicklung im Lkw-Sektor und deren Markteinführung beschleunigen würden.

### **Spezielle Anforderungen für den Brennstoffzelleneinsatz in Lkw**

*Hohe Wirkungsgrade der BZ sind bei Lkw wichtiger als bei Pkw.*

Verglichen mit der Pkw-Nutzung liegen bei Lkw die jährlichen Fahrleistungen etwa fünf- bis siebenmal höher. Mit zunehmender Jahresfahrleistung dominieren die laufenden Kosten, insbesondere die Kraftstoffkosten, die Total Cost of Ownership (TCO). Dementsprechend führen relative Wirkungsgradverbesserungen und die damit einhergehende Sen-

kung der laufenden Kosten zu positiven Effekten auf das Marktpotential. Ähnliche Effekte können durch Senkung der Erzeugungs- und Distributionskosten für Wasserstoff erreicht werden. Die TCO-Ergebnisse zeigen sich bezüglich einer Absenkung der Anschaffungskosten hingegen weniger sensitiv.

*Beim Aufbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes müssen die Anforderungen der Lkw berücksichtigt werden.*

Die Frage der Art der mobilen Speicherung ist eng verknüpft mit dem Wasserstoff-Tankstellennetz. Dieses muss einerseits den Anforderungen der Lkw-Verkehre gerecht werden und keine Umwege zum Betanken der Lkw zur Folge haben. Andererseits ist die Dimensionierung der Wasserstoff-Tankstellen und die damit verbundenen Kapazität auf die Tourenplanung und Pausenregelung des Lkw-Verkehrs abzustimmen. Die Einsatz- und Routenplanung von Transportdienstleistern setzt enge Rahmenbedingungen für die Tankstopps der Lkw. Eine Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur muss diese speziellen Anforderungen der Lkw hinsichtlich Standort, Dimensionierung und technischer Auslegung (700 bar) berücksichtigen.

*Hohe Zuverlässigkeit muss gewährleistet sein.*

In Diskussionen mit Transportdienstleistern werden stets die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge thematisiert. Können die Fahrzeuge nicht zum Transport eingesetzt werden, sinkt ihre Einsatzflexibilität, und es entstehen zusätzliche Kosten. Die BZ-Lkw sollten demnach gleichwertige technische Verfügbarkeiten wie Diesel-Lkw aufweisen, da eine unzureichende Zuverlässigkeit der Fahrzeuge Mehraufwände und zusätzliche Risiken für Fuhrunternehmer bedeuten (z. B. Ersatzfahrzeuge vorhalten). Ebenso muss ein entsprechendes Servicenetz verfügbar sein.

Die Experteninterviews zeigen, dass die Zuverlässigkeit der BZ nach den Erfahrungen mit Demonstrationsprojekten von BZ-Bussen sehr hoch ist, bzw. vorhandene Ausfallzeiten sehr gering und eher auf allgemeine Busverkehrsprobleme zurückzuführen sind, die nicht mit dem Einsatz von BZ zusammenhängen.

### **Zusätzliche Anforderungen für Lkw über zwölf Tonnen zGG**

*Die Energiemenge in den Tanks muss erhöht werden.*

Bisherige Gespräche mit Akteuren des Transportsektors und der Fahrzeugproduktion ergaben, dass besonders die Integration der Wasserstofftanks in die Fahrzeuge eine Herausforderung darstellt. Gewicht und Volumen dürfen die Transportkapazität nicht in größerem Maße einschränken. Die Größe des „Fußabdrucks“ der Wasserstoff-Tanksysteme erschwert daher den Einsatz bei Fahrzeugen mit hohen Anforderungen an die Zuladungskapazität. In diesem Zusammenhang ist zu überprüfen, ob die flüssige Speicherung von Wasserstoff bei Langstrecken-Lkw das Reichweiten- und Volumen-/ Gewichtproblem lösen kann, welches gerade bei größeren Fahrzeugklassen problematischer wird.

*Die Akzeptanz von geringeren Reichweiten im Lkw-Bereich muss untersucht werden.*

Mit dem heutigen Tankvolumen kann mit einem Wasserstofftank gleicher Größe eine Reichweite von 300 bis 400 Kilometern zurückgelegt werden. Diese Reichweiten reichen aus, um die Strecke zwischen zwei Ruhepausen (ca. 325 km = 4,5 h bei 70 km/h) zurückzulegen. Die Betankungszeiten sind dabei ausreichend und stellen kein Problem dar. Die Akzeptanz von geringeren Reichweiten kann Bestand weiterer Untersuchungen sein. Hier sollte anwendungsspezifisch untersucht werden, welche akzeptable Mindestanforderungen an die Reichweite bestehen, um die Chancen eines frühzeitigen Markteintritts zu erhöhen.

*An BZ mit hoher Leistung bzw. BZ-Batterie-Hybridsystemen muss gearbeitet werden.*

An 350-kW-BZ wird im Moment noch nicht geforscht, die engl. „drayage trucks class 8“ bzw. „Nahverkehrs-Lkw“ arbeiten mit 150 kW. Sie kommen zwar aus dem Fernverkehr, werden aber zum Beispiel nur für kürzere Strecken in Häfen eingesetzt, wo sie 200 Meilen Fahrleistung pro Tag erbringen. Laut den Experten wird eine BZ aus wirtschaftlichen Gründen mit höchstens 200-240 kW verbaut und der Rest über eine Batterie bzw. innerhalb eines BZ-Batterie-Hybridsystems abgewickelt werden. Auch diese Hybridsysteme und deren Zuverlässigkeit und Lebensdauer gilt es weiter zu beforschen (inklusive der spezifischen Anforderungen an BZ, Batterie und Gesamtsystem).

*An der Skalierbarkeit der BZ und ihrer Nebenaggregate sollte geforscht werden.*

Um von den Kostensenkungspotentialen bei Pkw profitieren zu können, sollte ein Themenschwerpunkt die Hochskalierung der BZ und ihrer Nebenaggregate sein. Die Alternative stellen BZ-Batterie-Hybrid-Systeme dar. Bei den mit BZ-Batterie-Hybrid-Systemen ausgestatteten Bussen muss die Batterie nach Auskunft der befragten Expertinnen und Experten allerdings bereits beim Erreichen der Hälfte ihrer erforderlichen Reichweite bzw. Lebensdauer des BZ-Busses ausgetauscht werden. Diese kann damit den limitierenden Faktor bei BZ-Batterie-Hybrid-Systemen darstellen. Zudem treten derzeit noch Probleme bei der Skalierung von Nebenaggregate der BZ (z.B. Steuerung, Klimatisierung) auf.

*Demonstrationsprojekte sollten initiiert werden.*

Da bisher sowohl in Deutschland als auch weltweit kaum Demonstrationsfahrzeuge und Pilotprojekte von BZ-Lkw initiiert wurden, wäre dies ein erster Schritt zur Validierung der oben genannten FuE-Bedarfe in der Praxisanwendung. Bei kleinen Fahrzeugen sollte durch Demonstrationsprojekte die Alltagstauglichkeit gezeigt werden, schwere BZ-Lkw können in Pilotprojekten mit Herstellern und Zulieferer entwickelt werden. Dabei sind sowohl Transportdienstleister als auch die Infrastrukturbetreiber intensiv einzubinden. Ebenfalls wäre eine sozialwissenschaftliche Begleitforschung ratsam, um die Marktakzeptanz zu überprüfen.



## **Handlungsempfehlungen und FuE-Bedarf für BZ-Lkw**

Aus den vorangegangenen Ausführungen ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen sowie Forschungs- und Entwicklungsbedarf für BZ-Lkw.

Für BZ-Lkw und BZ-Pkw gilt:

1. Von den Erfahrungen mit BZ-Pkw und BZ-Bussen lernen. Konkurrenztechnologien angemessen berücksichtigen.
2. Spill-over-Effekte aus dem Pkw-Bereich nutzen, aber nicht überschätzen.

Für BZ-Lkw gilt zudem:

3. Zur Senkung des Verbrauchs Wirkungsgrad verbessern.
4. Anforderungen von BZ-Lkw beim Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur berücksichtigen.

Bei größeren Fahrzeugklassen gibt es weniger Technologiealternativen und die Dringlichkeit, hierfür Lösungen zu finden, steigt. Bei einer Ausweitung der BZ-Technologie in den schweren Lkw-Bereich (> 12 t) ergeben sich daher verschärfte Anforderungen und FuE-Bedarfe:

5. Der Energiegehalt der Wasserstofftanks muss erhöht werden (Energiedichte oder Größe der Tanks), um größere Reichweiten zu erzielen.
6. Die Akzeptanz der Fahrzeugnutzer (bzw. logistische Nutzbarkeit) für geringere Reichweiten sollte untersucht werden.
7. An BZ mit hoher Leistung bzw. BZ-Batterie-Hybridsystemen muss gearbeitet werden.
8. An einem Hochskalieren der BZ und deren Nebenaggregate sollte geforscht werden.
9. Demonstrations- und Pilotprojekte sollten initiiert werden, um im Praxisbetrieb weiter zu lernen.



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Die Bundesregierung in Deutschland hat sich ambitionierte Ziele zur Senkung der Treibhausgase (THG) gesetzt. Bis 2050 sollen sie um 80 bis 95 % (bezogen auf 1990) gesenkt werden<sup>1</sup>. Die UN-Klimakonferenz in Paris 2015 hat die weltweiten Anstrengungen zum Schutz des Klimas auf eine neue und ambitionierte Grundlage gestellt. Alle 196 Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention haben sich auf das Ziel verpflichtet, den Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur deutlich unter 2 °C zu halten, und streben eine Begrenzung auf 1,5 °C an.

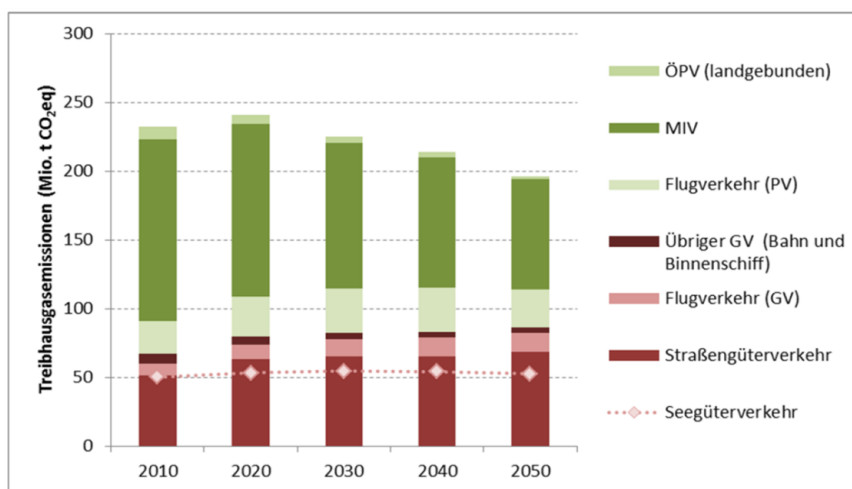


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutschland – Stand und Prognose (Quelle UBA (2013), BAU-Szenario)

Eine weitgehend dekarbonisierte Welt benötigt einen nahezu THG-freien Mobilitätssektor<sup>2</sup>. Fossile Kraftstoffe müssen deshalb weitgehend durch erneuerbare Kraftstoffe ersetzt werden. Biokraftstoffe können nur einen kleinen Teil der Mobilitätsnachfrage befriedigen<sup>3</sup>, weshalb strombasierte Kraftstoffe bzw. der direkte Stromeinsatz im Lkw-Sektor unter Klimaschutzaspekten dominieren werden. Während der Pkw-Verkehr zukünftig aufgrund stagnierender Bevölkerung voraussichtlich nicht stark steigen wird, gehen einschlägig

<sup>1</sup> Dies wurde im Integrierten Energie- und Klimaprogramm (IEKP) der Bundesregierung beschlossen (Bundesregierung 2007) und mit dem Koalitionsvertrag 2013 (CDU, CSU, SPD (2013)) bestätigt.

<sup>2</sup> Siehe u. a. die Studien (BMW 2014, UBA 2014) und (Repenning et al. 2015), wo gezeigt wird, dass der erdgebundene Verkehr bei ambitionierten THG-Minderungszielen weitgehend THG-frei sein muss, weil das verbleibende THG-Emissionsbudget für andere Sektoren wie die Landwirtschaft und Industrie sowie anderen Mobilitätsanwendungen wie dem Flugverkehr genutzt werden muss.

<sup>3</sup> Siehe hierzu die Diskussion in (UBA 2016) sowie den dortigen Verweis auf globale Studien und der beschränkten Verfügbarkeit von nachhaltigen Biomassepotentialen für den Verkehr.

bekannte Prognosen von einem deutlichen Anstieg der Beförderungsleistung im (Straßen-)Güterverkehr aus. Der Anteil der Lkw an den verkehrsbedingten THG-Emissionen wird daher zukünftig zunehmen, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden (vgl. Abbildung 1). Somit steht man heute vor der Herausforderung, für den Lkw-Verkehr Lösungen zur Dekarbonisierung zu finden.

Tabelle 1: Kennzahlen für Lkw und potentielle strombasierte Antriebstechnologien unterschieden nach Gewichtsklassen

Größenklasse	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	Sattelzüge
zGG <sup>1)</sup> (t)	(0 t; 3,5 t)	(3,5 t; 7,5 t)	(7,5 t; 12 t)	(12 t; 26 t)	(40 t)
Ø JFL <sup>2)</sup> (km/a)	ca. 13 Tsd.	ca. 27 Tsd.	ca. 66 Tsd.	ca. 74 Tsd.	ca. 106 Tsd.
Bestand (Fzg.)	ca. 2 Mio.	ca. 262 Tsd.	ca. 77 Tsd.	ca. 161 Tsd.	ca. 183 Tsd.
Fahrleistung (Fzg.-km/a)	26 Mrd.	7,1 Mrd.	5,1 Mrd.	11,9 Mrd.	19,4 Mrd.
CO <sub>2</sub> -Emission <sup>3)</sup> WTW <sup>5)</sup> (g/Fzg.-km)	241	431	594	781 <sup>4)</sup>	1.016
CO <sub>2</sub> -Emission WTW (Mio. t CO <sub>2</sub> /a)	6,3	3,0	3,0	9,3	19,7
Energiebedarf TTW <sup>6)</sup> (TWh/a)	19,0	9,2	9,1	28,1	59,5
Potentielle strombasierte Antriebstechnologien	BEV/PHEV <sup>7)</sup>				
	Brennstoffzelle				
	Methan				
	Flüssige Kraftstoffe (wie Methanol, Fischer-Tropsch-Kraftstoffe, ...)				
				HO-Lkw <sup>8)</sup>	

1) zulässiges Gesamtgewicht; 2) Jahresfahrleistung; 3) Ø alle Straßenkategorien, Euro-VI, Auslastung 50 %; 4) mit dem Bestand gewichtetes Mittel aus 'Lkw > 14-20 t und 'Lkw > 20-26 t; 5) Well-to-Wheel-Emissionen; 6) Tank-to Wheel-Emissionen; 7) reine Batteriefahrzeuge (BEV) sowie Plug-in-Hybride (PHEV); 8) Hybridoberleitungs-Lkw. Quellen: KBA 2014a, KBA 2015); Handbook Emission Factors for Road Transport 3.1 sowie Truckscout 2013

Tabelle 1 gibt einen nach Gewichtsklassen (GK) differenzierten Überblick zu den Beständen, Fahrleistungen und THG-Emissionen im Lkw-Sektor. Hieraus wird ersichtlich, dass hinsichtlich des Ausstoßes an CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie dem Energiebedarf im Lkw-Sektor die Gewichtsklassen GK1, leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht sowie insbesondere die schweren Sattelzüge und die Lkw der GK4 relevant sind.

Brennstoffzellen-Lkw (BZ-Lkw), angetrieben mit Wasserstoff, können eine lokal emissionsfreie Alternative zu heutigen Lkw sein, wenn sie mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben werden. Bereits heute sind BZ-Lkw in Pilotprojekten im Einsatz, vornehmlich aber in den kleineren Größenklassen. Ob sich BZ-Lkw in dieser und gerade auch in der GK4 und bei Sattelzugmaschinen (SZM) durchsetzen können, bedarf weiterer Forschung und Entwicklung.

## **1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Ziel dieser Studie ist es, den Forschungs- und Entwicklungsbedarf für BZ-Lkw zu ermitteln, um eine wichtige Technologieoption für die Zukunft im Lkw-Bereich zur Verfügung zu haben, die künftig konkurrenzfähig zu anderen Antriebsarten sein wird.

Dafür wird im Rahmen dieser Studie zunächst der nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungsstand aufgezeigt (Kapitel 2), um anschließend das Marktpotential von BZ-Lkw auch gegenüber Konkurrenztechnologien in Deutschland zu ermitteln (Kapitel 3). Kapitel 4 fasst die aus den vorangegangenen Kapiteln abgeleiteten Handlungsempfehlungen zusammen.



## 2 Nationaler und internationaler Forschungs- und Entwicklungsstand bei BZ-Lkw

In diesem Kapitel wird der Stand von Forschung und Entwicklung (FuE) bei BZ-Lkw auf der Basis von internationalen *Publikations- und Patentrecherchen* (siehe Abschnitt 2.1), *Experteninterviews* und der Auswertung nationaler und internationaler *Studien* sowie Forschungs- bzw. Förderprogrammen und Demonstrationsprojekten aufgearbeitet (siehe Abschnitt 2.2). Hierbei werden der nationale und internationale Stand der Forschung, Akteure und Regionen mit hoher Aktivität in diesem Feld sowie FuE-Schwerpunkte und -Herausforderungen identifiziert sowie mögliche Lücken für Deutschland herausgearbeitet und in einer Stärken-Schwächen-Analyse zusammengefasst (siehe Abschnitt 2.2.4 und 2.3).

### 2.1 Quantitative Analyse – Publikationen und Patente zu Brennstoffzellen in Nutzfahrzeugen

Zur Durchführung der Publikationsanalysen wurden zunächst stichwortbasierte Suchstrategien entwickelt, um Themen wie die Brennstoffzellentechnologie, FuE im Bereich Automotive, Nutzfahrzeuge, Lkw und Busse gegeneinander abzugrenzen. Durch eine Kombination der Suchstrategien konnten in einem zweiten Schritt FuE-Aktivitäten im Bereich der Brennstoffzellen-Fahrzeuge (darunter entsprechende Nutzfahrzeuge) identifiziert und analysiert werden.

Ein Vergleich unterschiedlicher Datenbanken (insbesondere die Thomson Reuters-Datenbank Web of Science (WoS) (Reuters 2016) und die Elsevier-Datenbank Engineering Index (Ei) Compendex (Elsevier 2016)) führte dabei zu der Entscheidung, die Datenbank Ei Compendex für die Publikationsanalysen heranzuziehen, da diese einen stärkeren Schwerpunkt auf Ingenieurwissenschaften legt und zu einer größeren Anzahl identifizierter Publikationen führt. Insbesondere, da die Anzahl der Publikationen bei der ganz konkreten Einschränkung auf BZ-Lkw sehr gering wird, und Publikationen im WoS stärker grundlagenorientierte Forschungsaktivitäten abdeckt, lieferte die Datenbank Ei Compendex höhere Trefferzahlen. Grundsätzlich gilt es daher, stets strukturelle Vergleiche vorzunehmen, denn solche sollten in der Regel unabhängig von der gewählten Datenbank zu vergleichbaren Aussagen führen. Dies zeigte sich zum Beispiel im Vergleich der beiden Datenbanken. Beide Datenbanken haben weiterhin eine weltweite Abdeckung.

Zur Durchführung der Patentanalysen wurden wie für Publikationsanalysen insbesondere stichwortbasierte Suchstrategien für die genannten Technologiebereiche entwickelt. Es wurde die Datenbank Derwent World Patents Index (DWPI 2016) genutzt, da diese für stichwortbasierte Suchvorgänge geeignet ist und wiederum zu (mit anderen Datenbanken vergleichsweise) höheren Trefferzahlen führt. Um Ländervergleiche anstellen zu können, wurden transnationale Patente (European patent (EP)/Patent Cooperation Treaty (PCT)-Anmeldungen (EPA 2016, WIPO 2016) betrachtet, das heißt, keine Patentanmeldungen

an nationalen Ämtern, wodurch einzelne Länder bevorzugt werden könnten. Die Publikations- und Patentanalysen wurden im Zeitraum November/Dezember 2015 durchgeführt.

### **2.1.1 Publikationsanalysen**

Zunächst wurden die zeitlichen Verläufe der Publikationen für die Bereiche Automobile, Nutzfahrzeuge (Lkw und Busse) und Brennstoffzellen insgesamt sowie deren Kombination untersucht. Abbildung 2 zeigt dabei, dass die weltweite Anzahl der Publikationen zu Brennstoffzellen stetig zunimmt, Publikationen zu Nutzfahrzeugen und Automobilen hingegen (alle Automobilitätskonzepte, in Abbildung 2 durch den Faktor 10 geteilt) seit 2010/2011 stagnieren. Zur Brennstoffzellentechnologie in Nutzfahrzeugen gibt es deutlich weniger Publikationen als zur Brennstoffzellentechnologie in Automobilen insgesamt (etwa zehnmal weniger).

Um das Wachstum auch für kleine Teilfelder sichtbar zu machen, wurden die Zahlen in Abbildung 3 auf das Niveau von 2000 (= 100 %) normiert. Es wird daran deutlich, dass das Wachstum bei Publikationen zu „nur“ Brennstoffzellen sowie Brennstoffzellen für Automobile hoch ist, dass dieses allerdings von Publikationen zu Brennstoffzellen für Nutzfahrzeuge noch deutlich übertroffen wird. Wieder zeigt sich die Stagnation der Publikationen zu Automobilen und Nutzfahrzeugen (insgesamt), was auf die hohe Reife des „klassischen“ Automobilsektors hinweist.

Abbildung 4 zeigt die Publikationsanteile von Brennstoffzellen-Fahrzeugen bezogen auf Publikationen zu Fahrzeugen insgesamt (nach Automotive und Nutzfahrzeugen). Publikationen zu BZ-Autos liegen demnach in den letzten Jahren auf der Ebene von 2 % (zuletzt bis 2,5 %) und Publikationen zu BZ-Nutzfahrzeugen bei rund 3 % (zuletzt über 3,5 %) aller Publikationen im Bereich der Fahrzeuge. Die Anteile lagen im Jahr 2000 noch unter 1 % und stagnierten um 2006/2007 auf dem Niveau von 2 bzw. 3 %. Aktuell scheint das Thema als Forschungsgegenstand erneut an Bedeutung zu gewinnen.



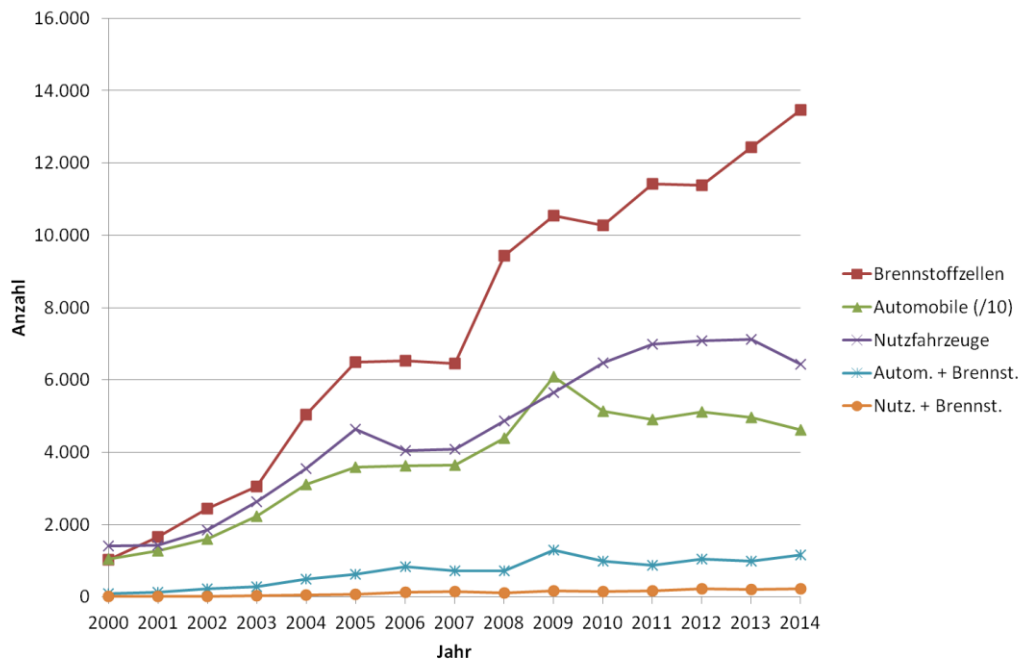


Abbildung 2: Weltweite Publikationen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen)

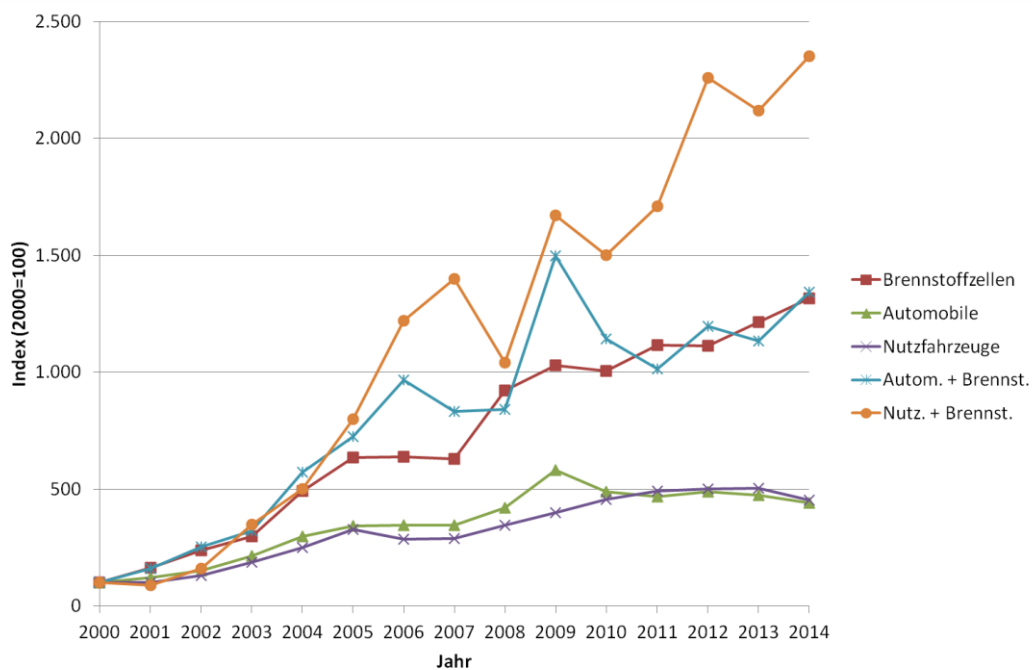


Abbildung 3: Weltweite Publikationen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen, standardisiert auf das Jahr 2000 (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen)

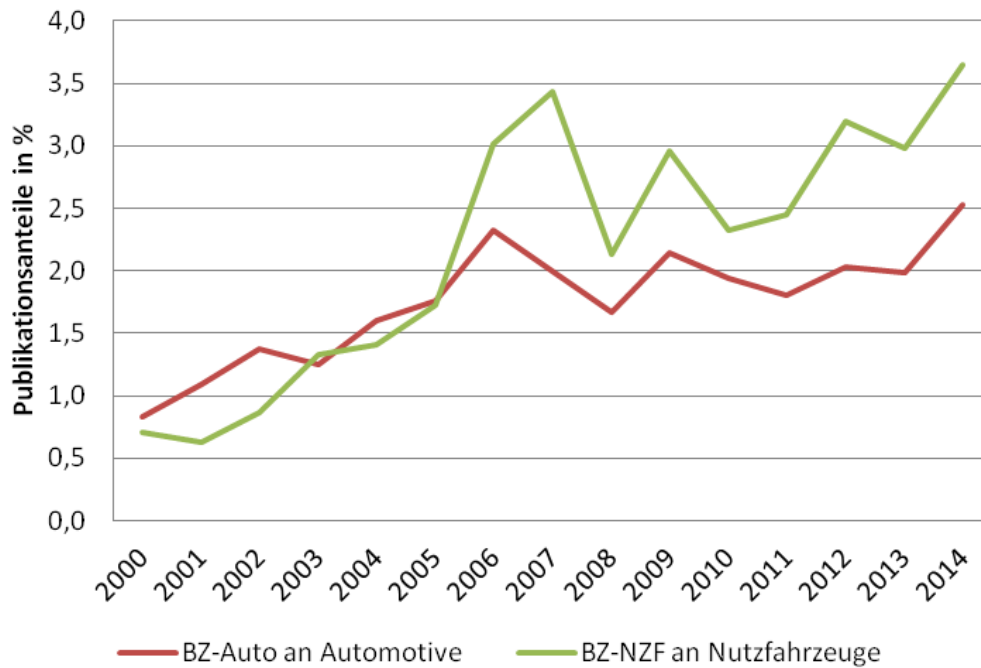


Abbildung 4: Publikationsanteile Brennstoffzellen-Fahrzeuge bezogen auf Fahrzeuge gesamt (nach Automotive und Nutzfahrzeugen/NZF), Anteile in Prozent (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen)

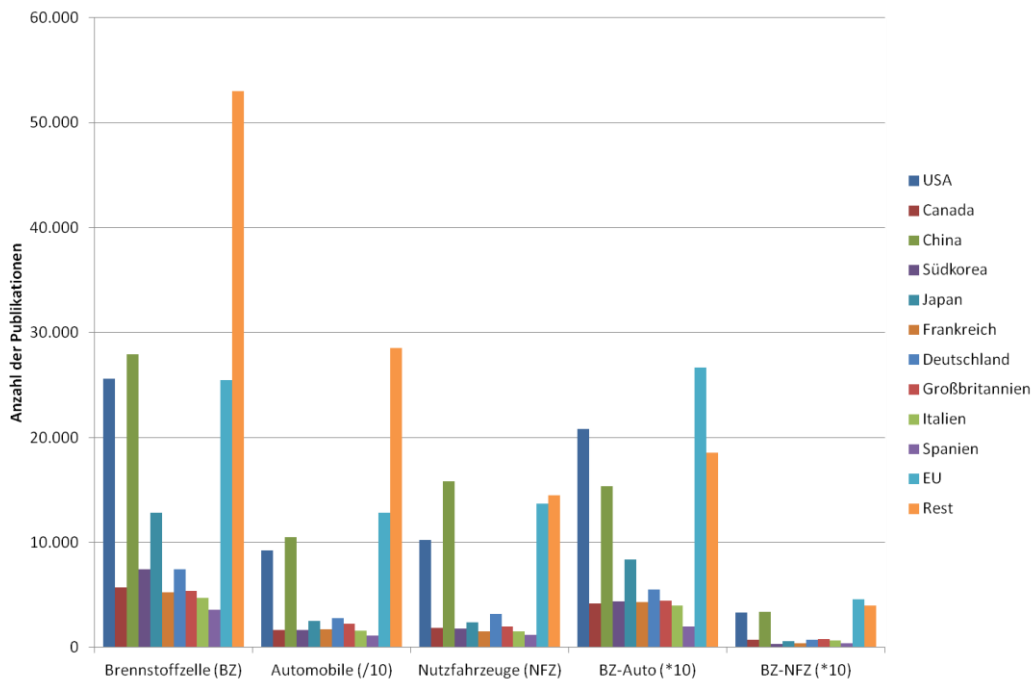


Abbildung 5: Publikationen aus ausgewählten Ländern im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen, 2005-2014 (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen)

Bei der Analyse von Publikationen in den einzelnen Teilfeldern nach Ländern (Abbildung 5 für die letzten zehn Jahre, 2005-2014) zeigt sich eine hohe Präsenz der USA und Chinas in allen Teilfeldern. Japan trägt besonders im Bereich der Brennstoffzellenforschung mit vielen internationalen Publikationen bei und ist in der Regel drittstärkster Akteur, meist dicht gefolgt bzw. auf einer Ebene mit Deutschland. Die Rolle Deutschlands dominiert zwar innerhalb der EU, jedoch tragen erst alle EU-weiten Publikationen (EU28) zu ähnlichen Anteilen wie die USA und China bei. Während alle weiteren weltweiten Länder zusammen neben den zehn hier gezeigten Ländern bei der Automobil- und Brennstoffzellenforschung immer noch einen deutlichen Anteil ausmachen, reduziert sich dieser Anteil bei Nutzfahrzeugen, BZ-Autos und BZ-Nutzfahrzeugen. Somit fokussiert bzw. konzentriert sich die FuE bei zunehmender Spezifizierung des Fachgebiets auf einzelne Länder.

Abbildung 6 zeigt hierbei noch deutlicher die Länderanteile nach Teilfeldern.

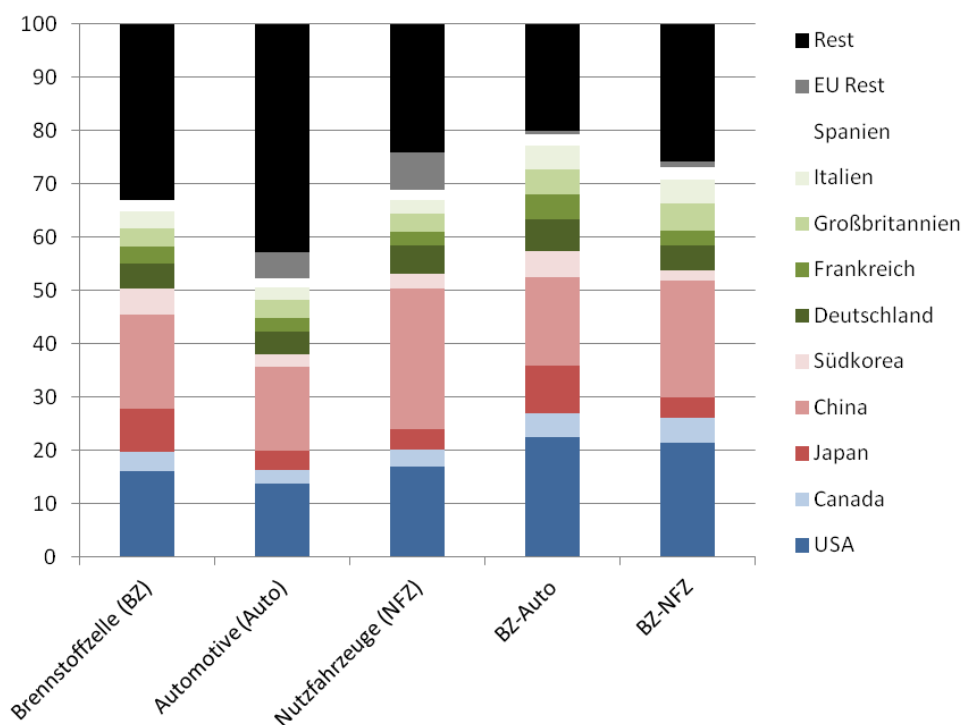


Abbildung 6: Publikationsanteile ausgewählter Länder im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen in Prozent, 2005-2014 (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen)

### 2.1.2 Patentanalysen

Bei den Patentanmeldungen werden transnationale Patente betrachtet, die europäische oder internationale Anmeldungen (ohne Doppelzählungen) kombinieren. Sie haben einen überdurchschnittlichen Wert (zum Beispiel gegenüber nationalen Patentanmeldungen), da sie länderübergreifend Schutzrechte bieten, und sie sind für Ländervergleiche gut geeignet. Die Patentanmeldungen zu Automobilen und darunter Nutzfahrzeugen nehmen im

Vergleich zu Publikationen (Abbildung 3) eher noch zu, was auf anwendungsnahe, weiterhin offene Technologiepotentiale der klassischen Antriebstechnologien hinweist (Abbildung 7 und Abbildung 8). Die Patentanmeldungen zur Brennstoffzellentechnologie sind hingegen deutlich rückläufig (insbesondere seit 2008). Dies könnte auch mit der zunehmenden FuE im Bereich der Batterietechnologien zusammenhängen, welche in diesem Zeitraum in den Fokus internationaler FuE-Förderung und der Automobilindustrie gerückt ist.

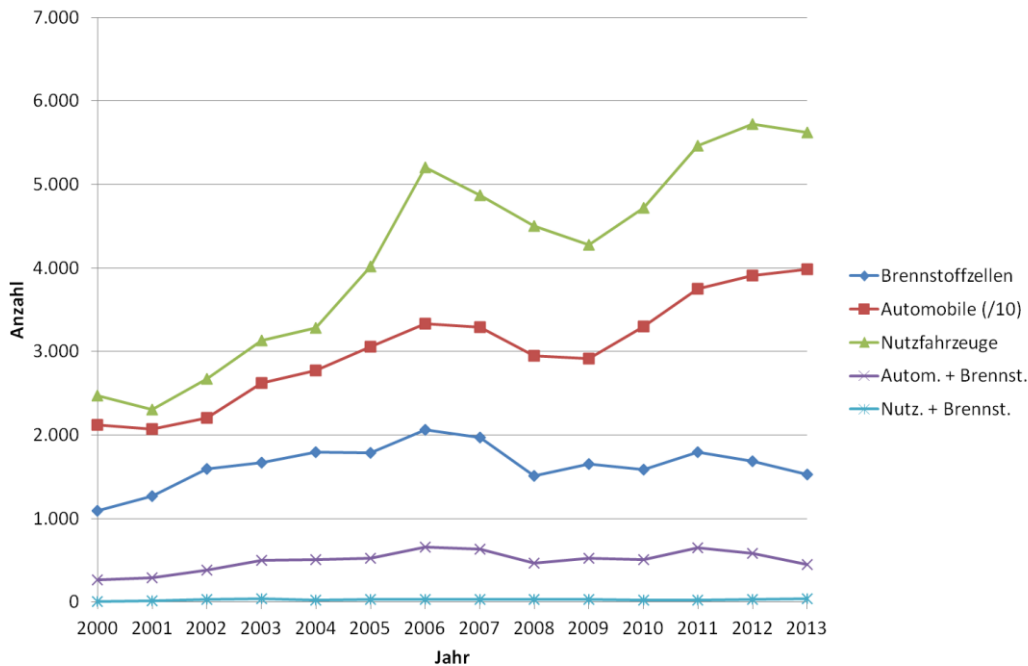


Abbildung 7: Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen)

Wieder zeigt sich, dass die Patentanmeldungen zu BZ-Autos und -Nutzfahrzeugen einen Bruchteil der Fahrzeug-Patentanmeldungen ausmachen, weshalb eine Normierung auf das Basisjahr 2000 (Abbildung 8) Hinweise auf die Wachstumsraten der Teilfelder im Vergleich gibt. Gerade für BZ-Nutzfahrzeuge zeigt sich in den aktuellsten Jahren (2012/2013) ein neuer dynamischer Anstieg der Technologieentwicklungsaktivitäten (bis zu einem rund Vierfachen der Anmeldeaktivitäten im Vergleich zum Basisjahr 2000). Dennoch liegt das Wachstum der Patentanmeldungen typischerweise über alle anderen betrachteten Kategorien bei 150 bis 250 % und damit deutlich unter der Dynamik wie im Fall der Publikationen (Abbildung 3). Bei den Publikationen war ausgehend vom Basisjahr 2000 eine deutlich über 1.000 % bzw. eine über zehnfache Zunahme der Aktivitäten rund um Brennstoffzellen sowie ihren Einsatz in Automobilen und Nutzfahrzeugen zu vermelden gewesen.

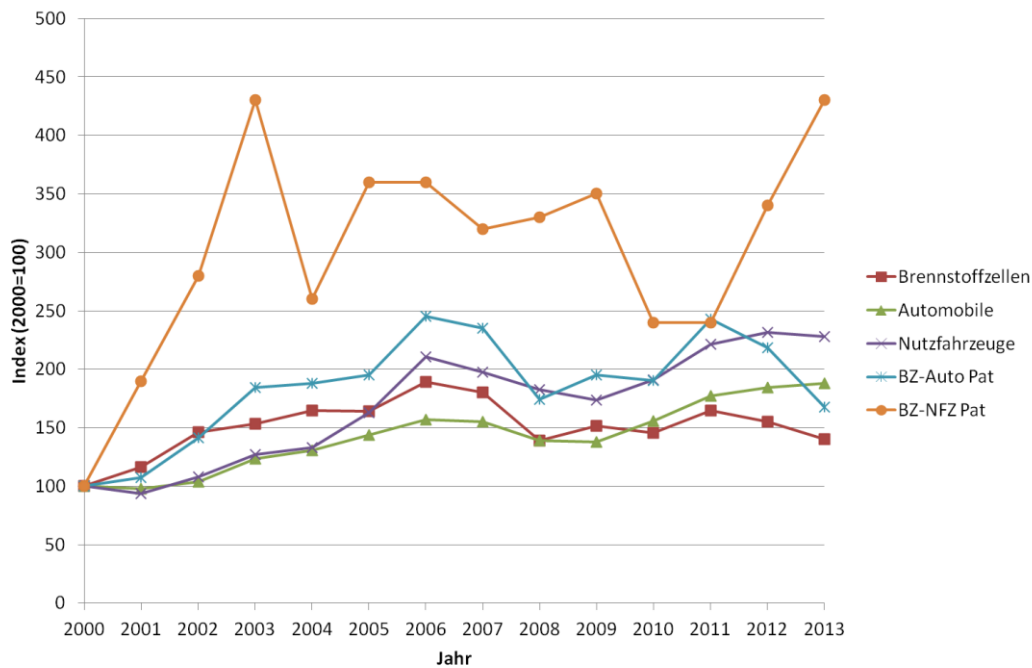


Abbildung 8: Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen normiert auf das Jahr 2000 (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen)

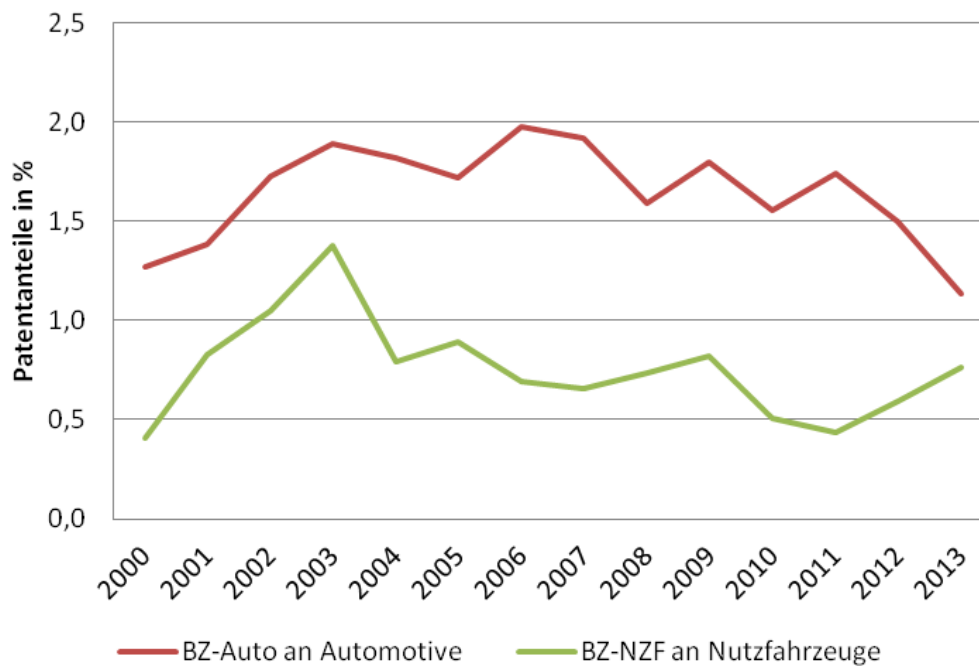


Abbildung 9: Patentanteile von BZ-Fahrzeugen bezogen auf Fahrzeuge insgesamt (nach Automotive und Nutzfahrzeugen), Anteile in Prozent (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen)

Abbildung 9 zeigt die Patentanteile von BZ-Fahrzeugen bezogen auf Patentanmeldungen zu Fahrzeugen insgesamt (nach Automotive und Nutzfahrzeugen). Anmeldungen zu BZ-Autos liegen demnach in den letzten Jahren auf der Ebene von 1,5 bis 2 % (zuletzt unter 1,5 % wie ursprünglich um 2000) und Anmeldungen zu BZ-Nutzfahrzeugen liegen bei 0,5 bis 1 % aller Patentanmeldungen im Bereich der Fahrzeuge. Aktuell scheint das Thema als FuE-Gegenstand bei nur einer von hundert Anmeldungen eine eher untergeordnete Rolle zu spielen. Auch könnte dies darauf hinweisen, dass die zentralen Fragestellungen zu dieser Thematik nicht nur mit der Automobiltechnik selbst zusammenhängen (zum Beispiel bestehen vielmehr Fragen der Wasserstoff- und Tankstelleninfrastruktur, welche hier nicht primär abgedeckt wären).

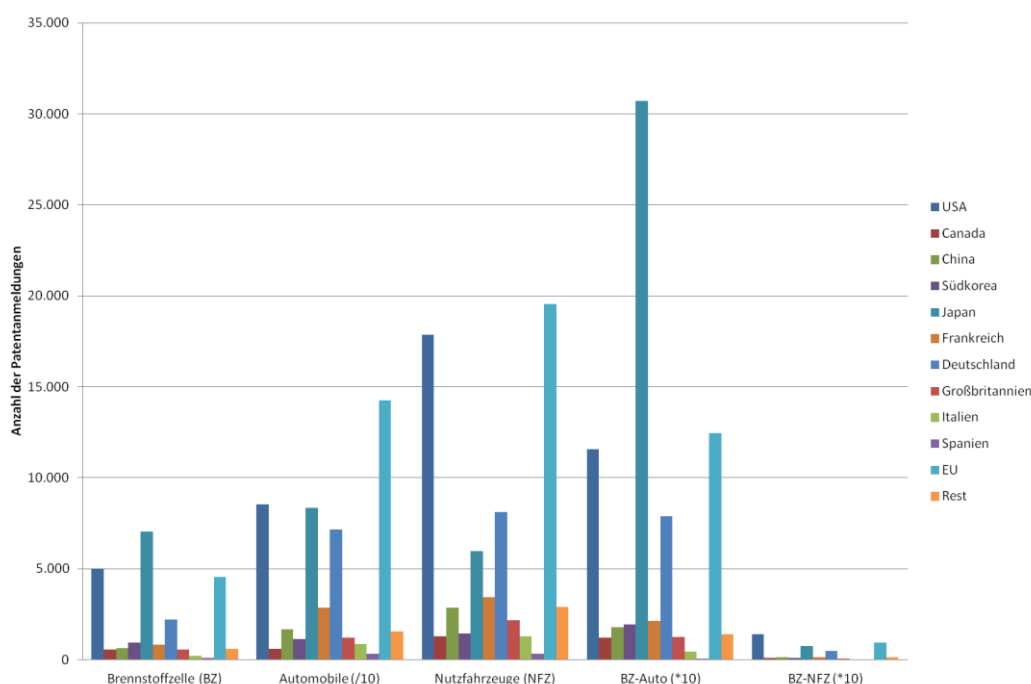


Abbildung 10: Patentanmeldungen ausgewählter Länder im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen, 2004-2013 (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen)

Bei der Analyse von Patentanmeldungen in den einzelnen Teilfeldern nach Ländern (Abbildung 10 für die letzten zehn Jahre, 2004-2013) zeigt sich eine hohe Präsenz der USA und Japans in allen Teilfeldern. Japan dominiert im Bereich der anwendungsnahen Brennstoffzellenentwicklung sowie konkret der BZ-Automobile, die USA zum Beispiel im Bereich der Nutzfahrzeuge. Deutschland ist bei den Patentanmeldungen in der Regel drittstärkster Akteur – allerdings mit abwechselnd großem Rückstand zu Japan und den USA – und trägt bereits mit rund 50 % zu den EU-weiten Patentanmeldungen bei (EU28).

Im Vergleich zu den Publikationsaktivitäten ist eine deutliche Konzentration der Patentaktivitäten in einigen wenigen Ländern zu beobachten. Bis zu 90 % und mehr betragen die Patentanteile der hier gezeigten zehn Länder im Bereich der Brennstoffzellentechnologie, Automotive und Nutzfahrzeuge. Eine Diversifizierung zeigt sich vielmehr bei der Spezifi-

zierung des Fachgebiets (BZ-Autos, BZ-NFZ) mit 20 % oder mehr Patentanmeldungen aus weiteren (hier nicht gezeigten) Ländern. Abbildung 11 zeigt die prozentualen Länderanteile nach Teilfeldern bzw. Länderprofile über die Teilfelder hinweg. China ist hinsichtlich der analysierten Patentanteile auch deshalb so weit abgeschlagen, weil im Rahmen der vorliegenden Teilstudie ausschließlich transnationale Patente betrachtet und keine Patentanmeldungen an nationalen Ämtern berücksichtigt wurden, welche speziell in China die überwiegende Anzahl darstellen.

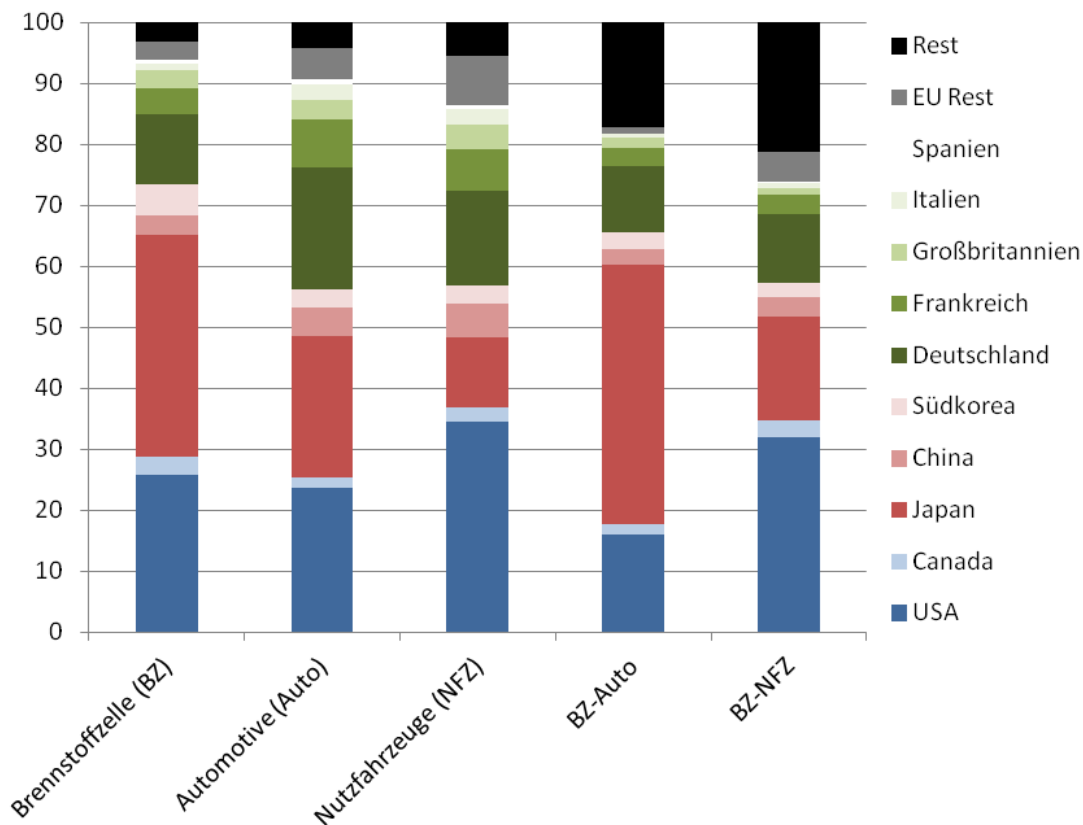


Abbildung 11: Patentanteile ausgewählter Länder im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen in Prozent, 2004-2013 (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen)

### 2.1.3 Unterschiede zwischen den Bereichen Lkw und Busse

Nach dieser allgemeinen Einsortierung der FuE-Schwerpunkte anhand von Publikations- und Patentaktivitäten und entlang spezifischer Teilfelder soll nun der Fokus weiter auf BZ-Lkw gelegt werden. In den Abbildung 12 und Abbildung 13 werden die Publikations- und Patentaktivitäten nach Ländern für BZ-Lkw und BZ-Busse aufgezeigt. Um zugleich die Dynamik in den Teilfeldern einschätzen zu können, werden jeweils die Zeiträume 2005-2009 und 2010-2014 für Publikationen sowie 2004-2008 und 2009-2013 für Patentanmeldungen gegenübergestellt.

Bei dem Vergleich zwischen Brennstoffzellen für Lkw oder für Busse zeigen sich Unterschiede in der Orientierung der Länder. Bei den Publikationen zu BZ-Lkw (Abbildung 12)

liegen die USA zusammen mit der EU (EU28, darunter Deutschland, Italien, UK, Frankreich, Spanien als zentrale Akteure) an der Spitze. Die Aktivitäten Chinas liegen in etwa auf dem Niveau von zum Beispiel Deutschland. Im Bereich der BZ-Busse hingegen kommen mit Abstand die meisten Veröffentlichungen aus China (gegenüber 2005-2009 haben sich die Publikationen zwischen 2010-2014 sogar mehr als verdoppelt). Die USA folgen nach, und die gezeigten EU-Länder tragen im Wesentlichen zu einer gesamten Publikationsaktivität auf einer vergleichbaren Ebene wie den USA bei.

Bei den Patentanmeldungen (Abbildung 13) liegt dagegen bei den BZ-Bussen Japan vorne (zudem auf ähnlichem Niveau wie die USA), während die internationalen Patentanmeldungen aus China hier (noch) auf einem niedrigen Niveau liegen. Deutschland trägt mit rund der Hälfte der Anmeldungen aller EU28-Länder als EU-weit führender Akteur bei, jedoch im Vergleich zu Japan und den USA auf deutlich geringerem Niveau. Mit Blick auf BZ-Lkw dominieren heute noch die USA anhand der Patentanmeldungen, jedoch nehmen die Anmeldezahlen ab und bewegen sich auf ein Niveau vergleichbar mit Japan und der EU (mit Deutschland wiederum als stärkstem Akteur und rund 50 % der Anmeldungen unter den EU28).

Vor allem die USA, Japan und EU28 dominieren somit die Patentanmeldungen zu BZ-Bussen und -Lkw. Die USA, China und EU (EU28, mit ähnlicher Stärke mehrerer EU-Länder) hingegen dominieren die Publikationsaktivitäten. China wird diese Forschungsanstrengungen erst auf Weltpatente (transnational) übertragen müssen.

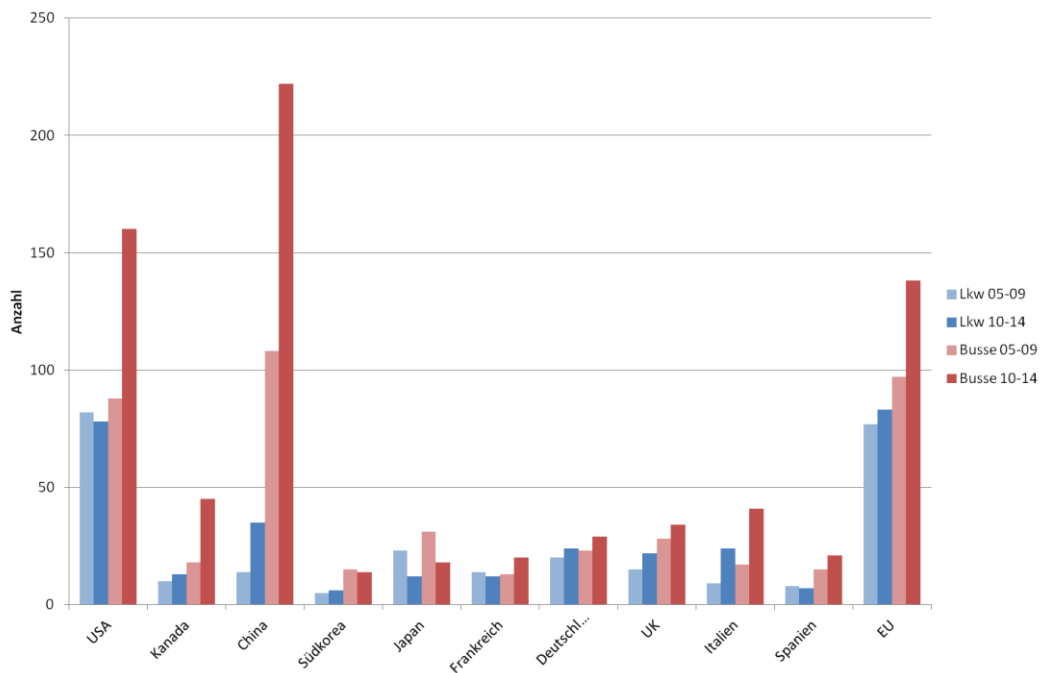


Abbildung 12: Publikationen ausgewählter Länder zu Brennstoffzellen für Lkw und Busse (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen)



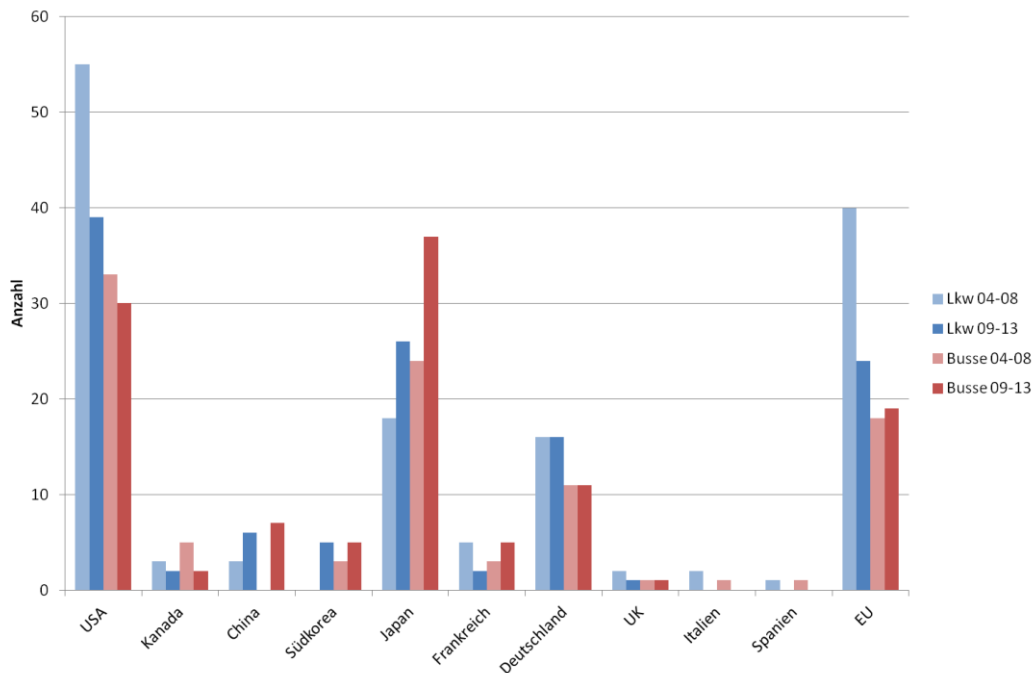


Abbildung 13: Transnationale Patentanmeldungen ausgewählter Länder zu Brennstoffzellen für Lkw und Busse (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen)

Deutliche Dynamiken bei Patentaktivitäten zeigen sich somit eher im asiatischen Raum (Japan, mit deutlichem Abstand auch China und Südkorea), die USA und Europa verlieren an Dynamik bzw. halten diese auf etwa gleich hohem Niveau (insbesondere Deutschland). Insgesamt ist für BZ-Lkw festzuhalten, dass gerade im Vergleich zu BZ-Bussen insgesamt immer noch recht wenige Publikationen gemeldet werden, wobei sich die Dynamik zwischen 2005-2009 und 2010-2014 insgesamt sogar eher rückläufig zeigt. In Richtung Marktdiffusion von BZ-Lkw fällt auf, dass die Dynamik bei den Patenten zwischen 2004-2008 und 2009-2013 insgesamt ebenfalls nachgelassen hat. Insbesondere bei den Publikationen hat Deutschland wie China eine große Aufholjagd vor sich, bei den Patenten ist Deutschland bereits heute gut positioniert, um auch in Zukunft mit den führenden Nationen USA und Japan im Kontext einer starken EU mitzuhalten.

#### 2.1.4 Spezialisierung der Länder

Für einen „technologie- und ländergrößenbereinigten“ Vergleich der Aktivitäten der zentralen Länder im Bereich der BZ-Lkw und BZ-Busse bietet sich der sogenannte RLA (engl. „Revealed Literature Advantage“ oder auch Relativer Publikationsanteil) sowie RPA (engl. „Revealed Patent Advantage“ oder auch Relativer Patentanteil) an. Die inhaltliche Schwerpunktsetzung der FuE-Aktivitäten wird dabei durch einen Spezialisierungsindikator abgebildet, welcher ausdrückt, ob sich ein Land oder eine Region im Vergleich zum internationalen Durchschnitt über- oder unterdurchschnittlich stark in einem Gebiet engagiert. Üblich ist dabei, den Anteil aller Publikationen bzw. Patente eines Landes in einem spezifischen Gebiet an den gesamten Publikationen bzw. Patenten dieses Landes in Relation

zum Anteil dieses Gebiets an den weltweiten Publikationen ins Verhältnis zu setzen. Sind die Anteile des Landes in dem Gebiet und der entsprechende weltweite Anteil gleich, führt dieses zu einem Neutralwert 1. Werte über 1 sagen dann aus, dass die Publikations- bzw. Patentaktivität des Landes über dem weltweiten Durchschnitt in diesem Gebiet liegt. Werte unterhalb 1 weisen umgekehrt daraufhin, dass die Publikationstätigkeit des Landes in diesem Gebiet unter dem Weltdurchschnitt liegt. Die beschriebene Relation hat den Nachteil, dass sie extrem schief verteilt ist und in dem Wertebereich 0 bis  $+\infty$  liegt. Es gibt Umrechnungsverfahren, bei denen dieser Spezialisierungs-Index den Neutralwert 0 hat und der Wertebereich von -100 bis +100 reicht, was für die Darstellung und Interpretation anschaulicher ist. Der RLA (für Publikationen) bzw. RPA (für Patente) wird mit diesem Umrechnungsverfahren wie folgt berechnet:

$$RPA \text{ bzw. } RLA = 100 \tanh \ln \left[ \frac{(P_{ij} | \sum_i P_{ij})}{(\sum_j P_{ij} | \sum_{ij} P_{ij})} \right], \text{ mit:}$$

$P_{ij}$  = Anzahl der Patente bzw. Publikationen eines Landes  $i$  in einem Feld  $j$ ,

$\sum_i P_{ij}$  = Anzahl der Patente bzw. Publikationen aller Länder in einem Feld  $j$ ,

$\sum_j P_{ij}$  = Anzahl der Patente bzw. Publikationen eines Landes  $i$  in allen Feldern,

$\sum_{ij} P_{ij}$  = Anzahl der Patente bzw. Publikationen aller Länder in allen Feldern.

Der Wert des Indikators ist 0, wenn die Spezialisierung dem internationalen Durchschnittswert entspricht. Überdurchschnittliche Aktivitäten liegen in Feldern mit positiven Indikatorwerten vor, negative Indikatorwerte bedeuten unterdurchschnittliche Aktivitäten. Der Maximal- bzw. der Minimalwert des Indikators liegen bei  $\pm 100$ , wobei Werte nahe -100 auf verschwindend geringe bzw. nicht vorliegende Aktivitäten in einem Feld hinweisen und mit Vorsicht zu interpretieren sind.

Abbildung 14 bis Abbildung 17 zeigen jeweils den RLA bzw. RPA zu BZ-Lkw und -Bussen für die Länder USA, China, Japan und Deutschland. Südkorea ist aufgrund aktuell steigender Aktivitäten (wie in Abbildung 12 und Abbildung 13 gezeigt) hier mit aufgenommen.

Der RLA zu BZ-Lkw in Abbildung 14 (für Publikationen) zeigt eine Spezialisierung der USA, welche jedoch zwischen 2010-2015 im Vergleich zu 2005-2009 abgenommen hat. Deutschland zeigt keine ausgeprägte Spezialisierung, was auf ausgewogene Aktivitäten über die Technikfelder hinweg hindeutet. Japan hat sich von einer früheren Spezialisierung zu einer Unterspezialisierung in diesem Bereich entwickelt (also nehmen andere Technikfelder neben BZ-Lkw eine höhere Aktivität ein). Auch China und Südkorea sind hier weiterhin unterspezialisiert.

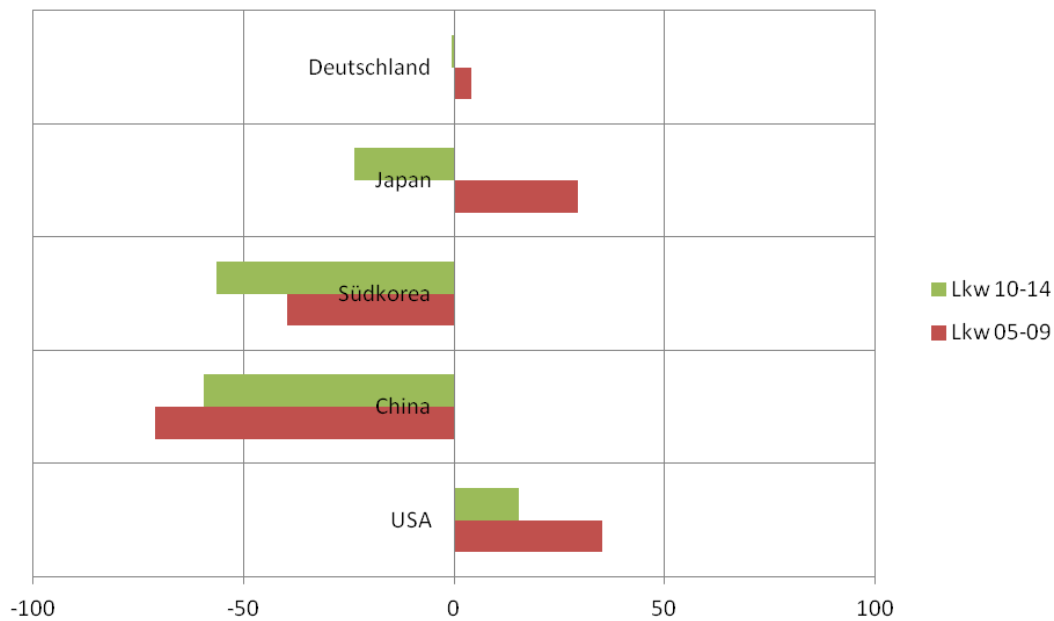


Abbildung 14: RLA (für Publikationen) zu BZ-Lkw (Quelle: eigene Erhebungen)

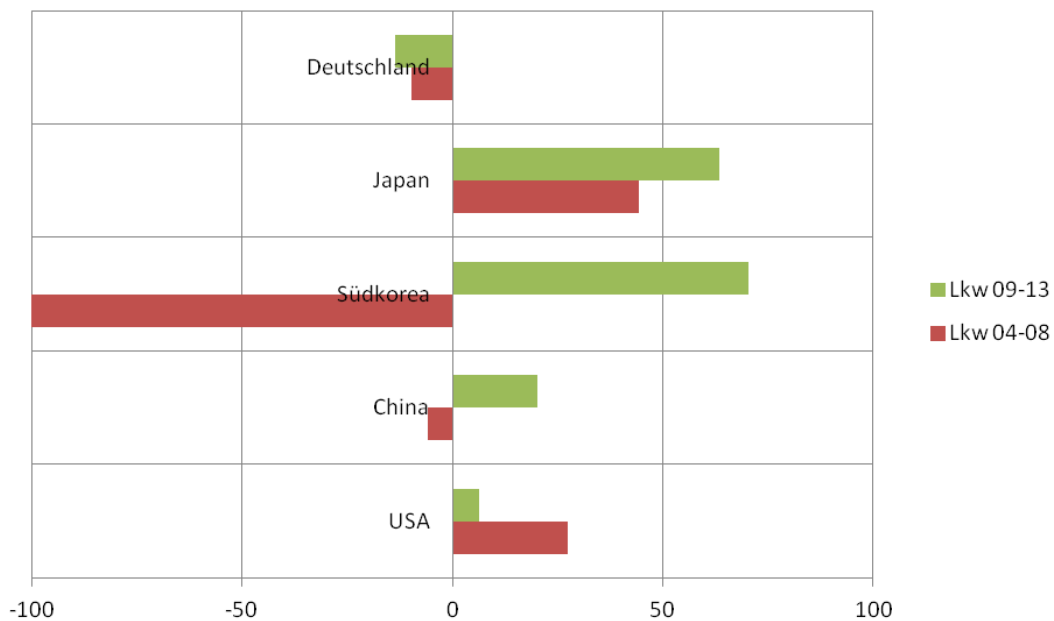


Abbildung 15: RPA (für Patente) zu BZ-Lkw (Quelle: eigene Erhebungen)

Der RPA zu BZ-Lkw in Abbildung 15 (für Patente) zeigt hingegen anhand der Patentanmeldungen gerade für die asiatischen Akteure ein deutlich unterschiedliches Bild, mit einer aktuell (2009-2013) hohen Spezialisierung Japans, Südkoreas und Chinas (im Vergleich zu den Vorjahren), während die USA nach früherer Spezialisierung aktuell weniger spezialisiert sind. Auch Deutschland ist hier unterspezialisiert.

Bei BZ-Bussen zeigt der RLA (für Publikationen) in Abbildung 16 eine aktuelle Unterspezialisierung aller Länder bis auf die USA, was insgesamt ein Hinweis auf eine technische Diversifizierung der Länder in unterschiedliche bzw. andere Gebiete und Technologien ist.

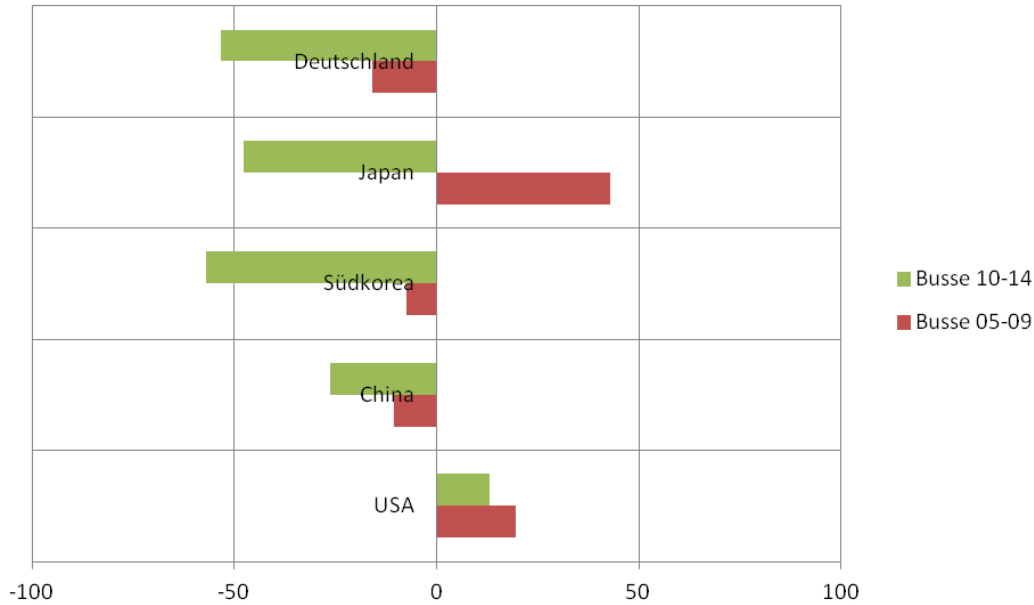


Abbildung 16: RLA (für Publikationen) zu BZ-Bussen (Quelle: eigene Erhebungen)

Der RPA zu BZ-Bussen (für Patente) in Abbildung 17 zeigt wieder ein ähnliches Bild wie der RPA zu BZ-Lkw. Japan und Südkorea (nicht China) sind in diesem Bereich spezialisiert. Die USA und Deutschland sind aktuell unterspezialisiert.

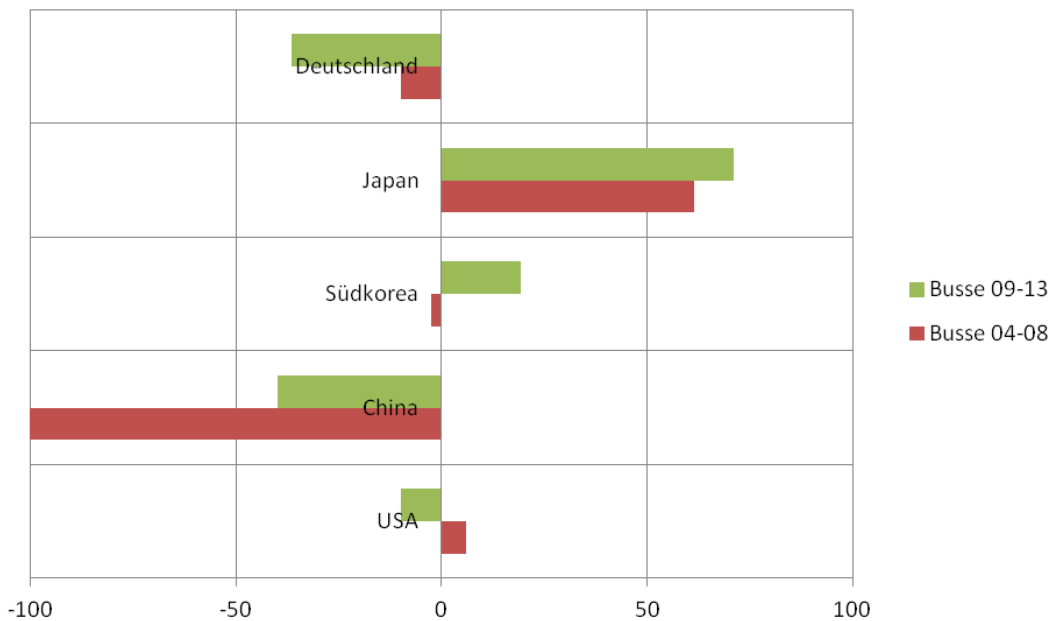


Abbildung 17: RPA (für Patente) zu BZ-Bussen (Quelle: Eigene Erhebungen)

Für die Publikations- und Patentaktivitäten lässt sich somit zusammenfassen, dass die USA und China die Entwicklungen bezüglich Publikationen dominieren und die USA, Japan, Deutschland hingegen Hauptanmelder von transnationalen Patenten sind. China ist vielmehr nationaler Anmelder, transnationale Anmeldungen Chinas nehmen aber zu, vergleiche zum Beispiel Abbildung 13, Abbildung 15, Abbildung 17. Akteurs-Analysen auf der Ebene von Einzelorganisationen bzw. Anmeldern (Patente) wurden hier nicht durchgeführt, jedoch lassen sich auf Basis der Patentrecherchen Unternehmen wie BASF (DE), Daimler (DE), Hyundai (KR), Nissan (JP), Sanyo (JP), Toyota (JP), etc. als wichtige Industrieakteure nennen.

## **2.2 Qualitative Analyse – Experteninterviews und Studien zum Forschungsstand von BZ-Lkw**

Im Rahmen der qualitativen Analysen war es das Ziel, den aktuellen Stand, noch offene Herausforderungen in FuE im Bereich der BZ-Lkw sowie aktuell durchgeführte und zukünftig geplante politische Maßnahmen wie Förderprogramme und Demonstrationsprojekte im internationalen Vergleich zu identifizieren. Als geographische Schwerpunkte wurden neben Deutschland die Länder China, Japan und die USA festgelegt, da die quantitativen Analysen (siehe Abschnitt 2.1) auf die größte FuE-Intensität gerade in diesen Ländern hinweisen.

Hinsichtlich des aktuellen Stands der Technik wurde im Projekt eine Technologietabelle mit einem Überblick zur Leistungsfähigkeit von BZ-Lkw in vier verschiedenen Gewichtsklassen erstellt und auf dieser Basis Fragen für die zu interviewenden Expertinnen und Experten vorbereitet. In einem ersten technologiebezogenen Teil des Fragebogens (Abbildung 18, zusätzliche obere Frage von Abbildung 19) sollten vor allem diese Tabelleninhalte validiert werden.

Gleichzeitig wurde mit umfangreichen Recherchen eine erste Stichprobe von politischen FuE-Fördermaßnahmen in allen Ländern erstellt, die zum einen die im Vorhinein getroffene Länderauswahl bestätigte und zum anderen die Grundlage zur Identifikation von geeigneten Expertinnen und Experten für die Interviews in einem politikbezogenen Teil des Fragebogens (Abbildung 19) legte.

Die Ergebnisse dieser qualitativen Analyse sind im Folgenden (siehe Abschnitt 2.2.1 bis 2.2.3) ausführlich wiedergegeben.

Internationales Monitoring von  
Brennstoffzellen-LKW und zukünftige  
Entwicklungen



Fragebogen

Vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe

Technologie

	Gewichtsklasse	GK1	GK2	GK3	GK4	SZM
Belastung Brennstoffzelle	Gewicht	< 3,5 t	< 7,5 t	< 12 t	< 26 t	< 40 t
	Jahresfahrleistung* ['000km]	11-23	24-43	35-69	27-94	78-121
	Jahresfahrleistung Median ['000km]	16	32	52	50	99
	Nutzungsdauer [Jahre]	10	10	10	10	8
	Gesamtfahrleistung ['000km]	160	320	520	500	792
Ausl. BZ	Leistung Dieselfahrzeug					ca. 300 - 350 kW
Auslegung Tank minimal	Verbrauch [kWh/km]	0,4	1	1,41	2,05	2,53
	Tankreichweite [km]	300	300	300	400	400
	Tankvolumen** (700bar, 20°C) [l]	91	227	320	621	767
	Tankvolumen** (700bar, -100°C) [l]	66	165	233	452	558
	Tankvolumen** (1000bar, 20°C) [l]	73	182	256	497	613
Auslegung Tank Diesel- äquiv.	Tankgröße Dieselfahrzeug*** [l]	75	120	120	570	570
	Verbrauch Dieselfahrz. [kWh/km]	0,82	1,46	2,01	2,65	3,44
	Reichweite Dieselfahrzeug [km]	920	821	597	2155	1656
	Tankvolumen**** (700bar, 20°C) [l]	279	622	638	3.347	3.174
	Tankvolumen**** (700bar, -100°C) [l]	203	452	464	2.434	2.308
	Tankvolumen**** (1000bar, 20°C) [l]	223	498	510	2.677	2.539

\* 25 Prozent- und 75 Prozent-Quantil

\*\* Energiedichte [kg/m<sup>3</sup>] von 40 (700 bar, 20 °C), 55 (700 bar, -100 °C) und 50 (1000 bar, 20 °C), siehe Quelle:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffspeicherung#/media/File:Storage\\_Density\\_of\\_Hydrogen.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffspeicherung#/media/File:Storage_Density_of_Hydrogen.jpg)

\*\*\* Energiedichte [kWh/l] von 10

\*\*\*\* Energiedichte Wasserstoff [kg/m<sup>3</sup>] von 40 (700 bar, 20 °C), 55 (700 bar, -100 °C) und 50 (1000 bar, 20 °C)

1. Mit welcher Lebensdauer der BZ ist je nach Gewichtsklasse zu rechnen – Unterschiede?
2. Mit welchen Fahrleistungen der BZ ist demzufolge je nach Gewichtsklasse zu rechnen?
3. Ist die BZ für den LKW-Bereich je nach Gewichtsklasse problemlos skalierbar bis 350 kW?

Abbildung 18: Erste Seite des für die Experteninterviews eingesetzten Fragebogens mit der im Projekt entwickelten Technologietabelle

4. Was sind die größten Herausforderungen, die aus der Sicht von Forschung und Entwicklung je nach Gewichtsklasse verbleiben?

**Politik**

5. Wie beurteilen Sie die Förderung zur Brennstoffzellentechnologie in Deutschland, insbesondere mit Blick auf den LKW-Bereich?

	Automobile	Busse	LKW	Logistik (z.B. Gabelstapler)
Deutschland				
China				
Japan				
USA				

••• = sehr stark, •• = stark, • = wird unterstützt, - = neutral

6. Welche großen Förderprogramme, Forschungsprojekte mit welchen Förderbeträgen würden Sie beispielhaft anführen?  
 7. Welche Schwerpunkte werden gefördert bzw. welche Aspekte sind Schwerpunkt der genannten Förderprogramme und Forschungsprojekte?  
 8. Welchen Vergleich ziehen Sie mit der Förderung von Brennstoffzellentechnologie in (den) anderen Ländern, insbesondere mit Blick auf den LKW-Bereich?

Abbildung 19: Zweite Seite des für die Experteninterviews eingesetzten Fragebogens

## 2.2.1 Stand der Technik

Nachfolgend soll der aktuelle Stand der Technik der Brennstoffzellentechnologie in BZ-Lkw kurz bewertet und danach auf bestehende Herausforderungen für FuE eingegangen werden. In diese Erwägungen werden auch BZ-Pkw und BZ-Busse mit einbezogen, welche sowohl in ihrer FuE als auch hinsichtlich der Marktkommerzialisierung den BZ-Lkw voraus sind und deshalb auch als Treiber für Letztere wirken: BZ-Lkw sind laut den befragten Expertinnen und Experten vom Stand ihrer FuE heute ungefähr an dem Zeitpunkt zu verorten, wo BZ-Pkw vor 10 bis 15 Jahren standen. Und dabei ist nicht nur die Brennstoffzelle an sich gemeint, sondern vielmehr die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Lkw allgemein, wo sich die entsprechenden Fahrzeughersteller noch nicht wirklich engagiert zeigen bzw. sich noch nicht deutlich positionieren.

Bezüglich der ersten beiden technischen Fragen – erstens, mit welcher Lebensdauer der BZ je nach Gewichtsklasse zu rechnen ist, und welche Unterschiede gibt es gegebenenfalls und zweitens, mit welchen Fahrleistungen der BZ demzufolge je nach Gewichtsklasse zu rechnen ist – liegen bisher vor allem in Bereichen wie Gabelstapler, BZ-Busse und im stationären Einsatz von Brennstoffzellen Erfahrungen vor. Auf dieser Basis ist festzuhalten, dass es je nach Anwendungsprofil und technischer Auslegung der BZ Unterschiede in der Lebensdauer gibt, die Lebensdauer aber für die gegebenen Anwendungen als ausreichend eingeschätzt wird.

Die befragten Expertinnen und Experten betonen, dass die Zuverlässigkeit der Brennstoffzellen nach den Erfahrungen mit Demonstrationsprojekten von BZ-Bussen sehr hoch ist bzw. vorhandene Ausfallzeiten sehr gering und eher auf allgemeine Busprobleme zurückzuführen sind, die nicht mit dem Einsatz von Brennstoffzellen zusammenhängen. Die Lebensdauer einer Bus-Brennstoffzelle ist dabei vergleichbar mit der von Dieseltreibenden Bussen, etwa 500.000 Meilen bzw. ungefähr 800.000 Kilometer, und dies gilt auch für die Lebensdauer des BZ-Busses im Vergleich zum dieseltreibenden Bus. Eine Vergleichbarkeit auf Augenhöhe und damit auch die Konkurrenzfähigkeit ist also hergestellt. Dieseltreibende Busse werden alle zwölf Jahre ausgetauscht, das scheint auch für BZ-Busse erreichbar, die Lebensdauer der Brennstoffzelle könnte die Lebensdauer des eigentlichen Fahrzeuges sogar übersteigen.

Beim Batterie-Bus bzw. mit Brennstoffzelle-Batterie-Hybridsystemen ausgestatteten Bussen muss die Batterie nach Auskunft der Experten bereits zur Hälfte der oben genannten Reichweite bzw. Lebensdauer ausgetauscht werden und stellt damit den limitierenden Faktor dar. Brennstoffzellen arbeiten deutlich länger, sind im Betrieb konstanter und erlauben eine höhere Lebensdauer. Deshalb werden BZ-Busse bei Demonstrationsprojekten von den beteiligten Busbetrieben gut angenommen. Die aktuellen Demonstrationsprojekte laufen etwa zwei bis drei Jahre. Im Anschluss kann der Busbetreiber entscheiden, ob die Fahrzeuge weiter im Dienst verbleiben oder nicht. Die Entscheidung hängt dann meistens davon ab, ob der Busbetreiber eine eigene Wasserstofftankstelle besitzt und wie sich sein Zugriff auf den benötigten Wasserstoff rechnet.

BZ-Lkw scheinen ebenfalls in allen engl. „heavy-duty“-Anwendungen genau so ihre Leistungen zu erbringen, wie es erwartet wird – die Demonstration läuft allerdings erst seit zwei bis drei Jahren. Für engl. „light-duty“-Anwendungen ist das nicht bekannt, weil entsprechende Demonstrationsprojekte noch fehlen.

Es ist deshalb laut der befragten Expertinnen und Experten noch zu früh, um die Frage der Lebensdauer bzw. Reichweite auch für BZ-Lkw abschließend zu beantworten. Hier gilt es zuerst, weitere Erfahrungswerte zu sammeln. Wie angemessen die angegebenen Fahrleistungen sind, hängt eindeutig von der anvisierten Anwendung ab, in der ein BZ-Lkw tatsächlich zum Einsatz kommen soll. Sie haben dann ganz andere Anforderungen an die eingesetzten Brennstoffzellen-Systeme.

Die Lebensdauer wird von Gewichtsklasse zu Gewichtsklasse abweichen. Erfahrungen mit dieseltreibenden „UPS class 5 packet delivery trucks“ (Abbildung 20) zeigen eine notwendige Lebensdauer von mehr als 22 Jahren bei ca. 125 Meilen Fahrleistung pro Tag, also 825.000 Meilen bzw. ungefähr 1,33 Mio. Kilometer Fahrleistung insgesamt (bei 300 Arbeitstagen/Jahr). Das hat zum einen mit exzellenter Wartung zu tun, aber auch mit genau definierten Routen etc. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die größte Bedeutung nicht auf der Lebensdauer liegt, sondern auf der Fahrleistung, getrennt nach Anwendungen: Sogenannte „Umfuhr-Lkw“ (engl. „drayage trucks class 8“) kommen aus dem Fern-



verkehr, werden aber zum Beispiel in Häfen für kürzere Strecken eingesetzt, wo sie 200 Meilen Fahrleistung pro Tag erbringen. Damit kommen sie auf eine Gesamtfahrleistung von bis zu 1 Mio. Meilen bzw. ungefähr 1,6 Mio. Kilometer – was mit Batterien aufgrund der zu kurzen Standzeiten für ihre Aufladung und vor allem ihres Gewichts gar nicht zu erbringen wäre (Zitat engl. „batteries are not even an option for long-haul trucking“).

An Brennstoffzellen, welche der Anforderung von 350 kW genügen, wird im Moment nicht gearbeitet. Die engl. „drayage trucks class 8“ arbeiten mit 150 kW, wobei für die Charakterisierung die Leistung nicht als alleiniges Merkmal ausreichend ist. 350 kW-Brennstoffzellen sind prinzipiell denkbar, wird es allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht geben, meinen die befragten Expertinnen und Experten. Das hängt auch damit zusammen, dass ein Lkw das Gewicht von BZ-System und Wasserstofftank nicht tragen sowie das Volumen des BZ-Systems im Lkw integriert werden kann, ohne zu viel Ladekapazität einzubüßen. Dazu kommt noch der Faktor des Modells (Hybride vs. Range extender). Von der Höchstgrenze her wird eine BZ deshalb höchstwahrscheinlich maximal 200 bis 240 kW als Grundlast leisten und der Rest bzw. die Spitzenleistung über eine Batterie innerhalb eines Brennstoffzelle-Batterie-Hybridsystems abgewickelt werden.

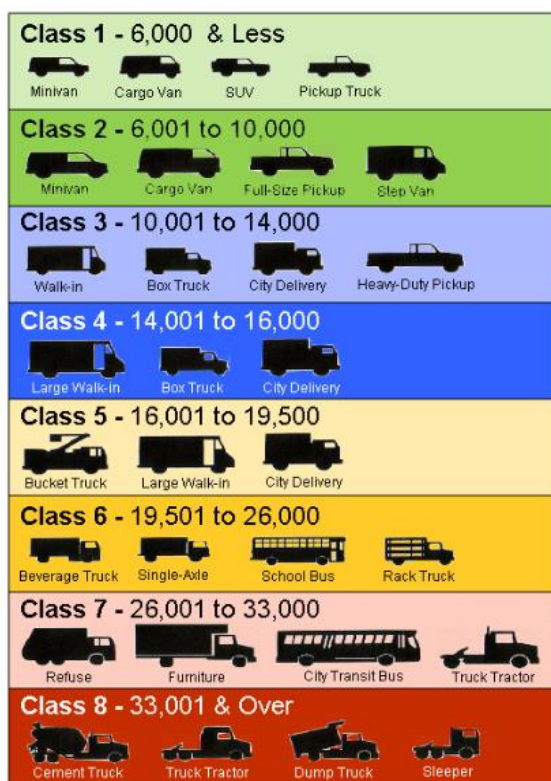


Abbildung 20: Amerikanische Klassifizierung von Lkw nach zulässigem Gesamtgewicht und beispielhaften Anwendungen (CTA 2014)

## 2.2.2 FuE-Herausforderungen

Interessant ist die von den befragten Expertinnen und Experten getroffene Feststellung, dass die eigentliche Herausforderung für die FuE an BZ-Systemen für BZ-Lkw nicht die Brennstoffzellen an sich darstellen, sondern die Speicherung von ausreichenden Mengen Wasserstoffs. Die Größe bzw. das Volumen des eingesetzten Wasserstoff-Tanks unterscheidet sich dabei je nach Gewichtsklasse des jeweiligen Fahrzeuges bzw. Anwendungsfalls und steigt mit dem Gewicht der einzubauenden BZ-Systeme deutlich an, je größer die Gewichtsklasse ist. Je nach Anwendungsfall gibt es hierbei Schwierigkeiten, die Tanks in das Fahrzeug zu integrieren und die Frage, ob die mit der Brennstoffzelle erreichte Reichweite für die spezifische Anwendung ausreicht oder ob der ökonomische Wert, der in Hinblick auf die geringere Ladefläche als Verlust entstehen würde, nicht zu groß ist. Die Expertinnen und Experten sprachen hier von einem „Fußabdruck“ der Brennstoffzelle im Sinne des von ihr eingenommenen Ladevolumens. Dieser „Fußabdruck“ ist deutlich kleiner geworden und nicht mehr viel höher als bei einem konventionellen Fahrzeug. Der „Fußabdruck“ des Wasserstoff-Tanks ist allerdings noch zu groß, das Volumen muss deutlich sinken. Für BZ-Busse ist das generell leichter bzw. der „Fußabdruck“ wesentlich kleiner, weil sie nach fest durchgeplanten Touren wieder an einem festen Standort innerhalb von Minuten wieder aufgetankt werden können. Die BZ-Kommerzialisierung muss aber eigentlich in der engl. „long-haul transportation“ stattfinden, wo die mit Abstand meisten Emissionen entstehen. Diese Speicherproblematik gibt es bereits heute für die engl. „drayage trucks class 8“, im Moment wird der Wasserstoff noch bei zwischen 350 bar und 500 bar abgespeichert. Irgendwann einmal/langfristig könnten es 700 bar sein. Engl. „drayage trucks class 8“ sind aber eher wie BZ-Busse im Sinne der relativ begrenzten Entfernungen, die sie zurücklegen. Hier geht es vor allem darum zu demonstrieren, dass die BZ-Lkw das Gewicht der BZ-Systeme inklusive der benötigten Wasserstoff-Tanks transportieren können.

Bestehende Herausforderungen für BZ-Lkw sind heute hauptsächlich nicht-technischer Natur, maßgebliche technische Probleme konnten in BZ-Pkw bereits gelöst werden. Exemplarisch genannt wurden die Tieftemperaturbeständigkeit der Brennstoffzelle (bei Minustemperaturen gefriert das in der Brennstoffzelle vorhandene Wasser, was zu Beschädigungen zum Beispiel in den Dichtungen führen kann) und Kaltstartprobleme, womit die Haltbarkeit bzw. Robustheit der Brennstoffzelle ebenso wie ihre Zuverlässigkeit sichergestellt ist. Dies kann somit auch die vergleichsweise geringen FuE-Aktivitäten (was Publikationen und Patente angeht, siehe Abschnitt 2.1) zu BZ-Fahrzeugen im Vergleich der FuE zu Fahrzeugen insgesamt erklären, welche bei weniger als 1 % bis hin zu etwa 3 % lagen.

Aus Sicht der befragten Expertinnen und Experten liegt die größte Herausforderung für BZ-Pkw vor allem in der Realisierung von Kostenzielen, die jedoch stark von den Produktionszahlen (Skaleneffekten) abhängig sind: Die Stückzahl produzierter BZ-Pkw muss

steigen, damit die Kosten für die Brennstoffzelle sinken können, was sich später auf die Kosten von Brennstoffzellen in BZ-Lkw auswirken wird. Insgesamt liegt eine Herausforderung auch in der Integration von BZ-Systemen aus BZ-Pkw in BZ-Busse und später in BZ-Lkw für die spezifischen Anwendungen, wobei es zwei verschiedene Vorgehensweisen gibt: Hochskalierung vs. größere Betriebseinheiten (zum Beispiel mit Batterie als Brennstoffzelle-Batterie-Hybridsystem).

Da die genannte Stückzahl wiederum von einer vorhandenen Wasserstoff- und Tankstelleninfrastruktur abhängt, kann man von indirekten Netzwerkeffekten sprechen, welche auch in der Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeicher eine wichtige Rolle spielen. Dementsprechend wurde von den befragten Expertinnen und Experten hervorgehoben, wie eng der Erfolg von BZ-Fahrzeugen (Pkw sowie Nutzfahrzeuge) mit der Etablierung einer Wasserstoffinfrastruktur verknüpft ist. Abgesehen von dem damit verbundenen „Henne-Ei-Problem“ in Bezug auf die Investition in Tankstellen (kommen zuerst die BZ-Fahrzeuge auf die Straße und dann die dafür benötigten Tankstellen oder zuerst die Tankstellen und dann nach und nach die sie nutzenden BZ-Fahrzeuge?) wurde an dieser Stelle allerdings explizit darauf hingewiesen, dass Wasserstofftankstellen für die Betankung von BZ-Lkw ausgelegt werden und eine weitaus höhere Menge von Wasserstoff speichern und zur Verfügung stellen müssen: Engl. „FCEV class 2/3“ tanken mit 700 bar auf, engl. „trucks class 8“ tanken mit 350 bar auf, während also BZ-Lkw nicht an Tankstellen für BZ-Pkw betankt werden können, sind BZ-Pkw eher an Tankstellen für BZ-Lkw zu betanken. Die heute geplanten BZ-Bus-Tankstellen wären also auch für BZ-Lkw auszulegen. Dazu kommt ein eher praktisches Problem aus dem Betriebsablauf von BZ-Lkw: Während BZ-Pkw üblicherweise in Städten oder entlang der großen Verkehrsstraßen aufgetankt werden, wird die Wasserstoffinfrastruktur für BZ-Lkw eher dort benötigt, wo sie ohnehin zum Stand kommen, also beim Be- und Entladen (Zitat engl. „trucks do not fuel where people fuel“). Wasserstofftankstellen für BZ-Pkw sind nicht gleichzeitig für BZ-Lkw nutzbar: Ein engl. „medium-duty class 6 truck“ verbraucht ca. 10 kg Wasserstoff, ein engl. „heavy-duty class 8 truck“ verbraucht ca. 20-30 kg Wasserstoff, und dabei geht es nur um die relativ kurze Strecken fahrenden engl. „drayage trucks class 8“. Solche Wasserstoffmengen müssen im großen Maßstab für zahlreiche BZ-Lkw bzw. Tankvorgänge erst einmal her- und bereitgestellt werden. Hieraus lässt sich schließen, dass bereits bei den Investitionen in Wasserstofftankstellen eine mögliche Nutzung von BZ-Lkw berücksichtigt werden muss. Zudem sei auf die hohen Investitionen selbst hingewiesen, welche für die Errichtung einer ausreichenden Wasserstoffinfrastruktur notwendig sind, unabhängig von der Nutzung durch Pkw oder Lkw.

Eine weitere Herausforderung in allen Gewichtsklassen ist die Demonstration der längerfristigen Nutzung über drei bis fünf Jahre hinweg, um dort Erfahrungen mit dem Einsatz von Brennstoffzellen in Lkw zu sammeln und zu zeigen, dass das Konzept funktioniert bzw. die Lebensdauer einer Brennstoffzelle je nach Anwendung ausreicht und in welchen

Anwendungen BZ-Lkw die bisher eingesetzten Diesel-betriebenen Modelle ablösen können. Erste Demonstrationsprojekte laufen bereits.

Etwas übergeordnet zur eigentlichen Forschung und Entwicklung an BZ für BZ-Lkw wurden weitere Herausforderungen genannt, die unter den Aktivitäten in Industrie und Politik (im Folgenden) abgehandelt werden. Dazu kommt noch die emissionsarme, günstige Wasserstoffproduktion mit Hilfe erneuerbarer Energien, ebenfalls ein Teil der oben angesprochenen Kostendarstellung von BZ-Fahrzeugen im Allgemeinen.

Tabelle 2: Übersicht ausgewählter Förderprojekte in Deutschland, Frankreich und in der Europäischen Union (EU) insgesamt

Projektname	Land/ Projektende	Schwerpunkte
Brennstoffzellensystem als Antrieb für Rotopress-Müllfahrzeug	DE (Förderkennz. 03BS212B-D) unter NIP/ 2013	Entwicklung eines Brennstoffzellen-Hybrid-Entsorgungsfahrzeugs mit deutlich reduzierten Lärm- und Abgasemissionen
REX – Brennstoffzellen Range Extender für Nutzfahrzeuge	DE (Förderkennz. 03BS107) unter NIP/ 2014	Entwicklung und Betriebsbegleitung eines BZ-Range Extender-Systems für elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge als konzeptionelle, modulare Lösung für unterschiedliche Plattformen bzw. Anwendungsbereiche
H2 Intradrive – Einsatz von H <sub>2</sub> -betr. Flurförderzeugen in der Intralogistik unter Produktionsbed.	DE (Förderkennz. 03BS112A-C) unter NIP/ 2016	Umweltfreundlichen und effizienten Wasserstoffantrieb für Flurförderzeuge unter realen Produktionsbedingungen erproben und zur Serienreife weiterzuentwickeln
Sustainable Hydrogen Evaluation in Logistics	EU (Projektnr. 256837, gefördert unter FP7-JTI)/ 2014	Demonstration der Marktreife von zehn BZ-Gabelstaplern mit der dazugehörigen Wasserstoff-Ladeinfrastruktur an vier Logistik-Standorten in Europa als Alternative zu Blei-Säure-Batterien oder Verbrennungsmotoren
Fuel Cell Based Power Generation	EU (Projektnr. 277844, gefördert unter FP7-JTI)/ 2015	Proof-of-concept sowie Labordemonstration einer BZ-basierten Lkw-Hilfsstromeinheit (engl. „auxiliary power unit“, APU) mit Protonenaustauschmembran-BZ (engl. „proton exchange membrane fuel cell“, PEM-FC)
Demonstration of 1st European SOFC Truck APU	EU (Projektnr. 278899, gefördert unter FP7-JTI)/ 2015	Demonstration der allerersten europäischen Lkw-APU auf Basis einer Festoxid-BZ (engl. „solid oxide fuel cell“, SOFC)
Sofc Apu For Auxiliary Road-truck Installations	EU (Projektnr. 325323, gefördert unter FP7-JTI)/ 2016	Entwurf, Optimierung und Einbau/Integration von fünf SOFC-Stacks in zwei mit Flüssigerdgas (engl. „liquefied natural gas“, LNG) betriebene Lkw-Plattformen als APU
Large scale demonstration of substitution of battery electric forklifts by hydrogen fuel cell forklifts in logistics warehouses	EU (Projektnr. 325381, gefördert unter FP7-JTI)/ 2017	Demonstration von Wettbewerbsfähigkeit, technischer Reife und Kundenakzeptanz BZ-Gabelstaplern als Alternative zu Batterie-betriebenen Gabelstaplern in der Warenhauslogistik
Lkw mit BZ-Batterie-Hybridsystem: Maxity Elektro 4,5 Tonnen	FR (La Poste, Renault Trucks / 2016	Einjähriger Test zur Verlängerung der Reichweite von ZEV-Fahrzeugen und Begünstigung der Entstehung eines französischen Wasserstoff-Transportsektors
Zero Emission Heavy Duty Drayage Truck Demonstration	South Coast AQMD (Project ID# VSS115)/ 2015	Entwicklung und Demonstration von vier verschiedenen ZEV-Umfuhr-Lkw-Modellen im realen Kontext, Messung und Analyse ihrer Leistungsfähigkeit sowie Beschleunigung ihrer Verbreitung

Eine Übersicht ausgewählter Förderprojekte bestätigt die oben getroffenen Aussagen weitgehend (Tabelle 2): Der Fokus liegt mittlerweile eindeutig auf der Demonstration von BZ-Lkw für spezifische Anwendungen. Daneben werden Brennstoffzellen auch als Hilfsstromeinheit (engl. „auxiliary power unit“, APU) getestet.

Tabelle 3: US-amerikanische Demonstrationsprojekte für mittelschwere BZ-Lkw (CARB 2015-2)

Lkw-Betreiber	Fahrzeugtyp	Ort	Anzahl Lkw
FedEx	Lieferfahrzeug (engl. „delivery van“)	Kalifornien/Tennessee	20
UPS	Lieferfahrzeug (- „... -)	Kalifornien	17
Center for Transportat. and the Environment	Lieferfahrzeug (- „... -)	Kalifornien	1
		<b>Total</b>	<b>38</b>

Auch in den USA und dabei vor allem in Kalifornien (siehe Abschnitt 2.2.3) laufen bereits einige Demonstrationsprojekte (CARB 2015-2). Hier sind mehr als fünfzig BZ-Lkw in einer Vielzahl von Anwendungen zum Beispiel für Abfall, Paketzustellung und Umfuhr geplant. Diese Demonstrationsprojekte sind von wesentlicher Bedeutung, um zu zeigen, dass BZ-Lkw ihren Beitrag zu einer Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor leisten können. Für mittelschwere BZ-Lkw gibt es Demonstrationsprojekte in Kalifornien und Tennessee, die mit Hilfe von öffentlichen Mitteln in Höhe von 7,1 Mio. US-Dollar realisiert wurden (Tabelle 3).

Tabelle 4: US-amerikanische Demonstrationsprojekte für schwere BZ-Lkw (CARB 2015-2)

Unternehmen	Fahrzeugtyp	Ort	Anzahl Lkw
Center for Transportat. and the Environment	Umfuhr-Lkw (engl. „drayage truck“)	Kalifornien	1
Port of Houston	Umfuhr-Lkw (- „... -)	Texas	3
U.S. Hybrid	Umfuhr-Lkw (- „... -)	Kalifornien	2
TransPower	Umfuhr-Lkw (- „... -)	Kalifornien	3
Hydrogenics USA, Inc.	Umfuhr-Lkw (- „... -)	Kalifornien	1
U.S. Hybrid	Müllfahrzeug (engl. „refuse truck“)	TBD	1
Vision Industries Corp.	Müllfahrzeug (- „... -)	Kalifornien	1
		<b>Total</b>	<b>12</b>

Schwere BZW-Lkw werden heute schon auf vorab definierten Strecken zum Beispiel in der Müllverwaltung oder in der Hafen-Umfuhr eingesetzt und zentral aufgetankt. Mehrere Demonstrationsprojekte hierzu laufen derzeit (Tabelle 4).

### 2.2.3 Aktivitäten in Industrie und Politik nach Ländern

#### China

In Bezug auf die Förderung von Brennstoffzellentechnologie ist über das chinesische Engagement keine spezifische Roadmap verfügbar. Im aktuellen „Energy Development Strategy Action Plan“ mit einer Laufzeit von 2014 bis 2020 fördert die chinesische Regierung die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie jedoch explizit als eine von 20 Schlüsseltechnologien im Bereich der Energietechnologien. Hervorzuheben ist, dass vorhandene Subventionsprogramme für Elektrofahrzeuge in den nächsten Jahren abgeschwächt werden, bei BZ-Pkw jedoch konstant bleiben (IPHE 2015). Des Weiteren sind Aktivitäten bei der Etablierung von Wasserstofftankstellen zu verzeichnen. Hier existiert ein Memorandum of Understanding (MoU) zwischen der Air Liquide S.A. und der SAIC Motor Corporation Ltd., welches im Beisein der Premierminister der beiden Herkunftsländer Frankreich und China unterzeichnet wurde (IPHE 2015). Mit Brennstoffzellen angetriebene Fahrzeuge werden bereits heute finanziell gefördert (Tabelle 5). Ein einzelner BZ-Bus und BZ-Lkw wird dabei mit 500.000 RMB subventioniert, was etwa 68.000 Euro entspricht (Stand: 31.03.2016). BZ-Fahrzeuge aller Kategorien bleiben steuerfrei. Gleichzeitig werden auch die Kraftstoffsubventionen für herkömmliche Busse gesenkt, damit mehr elektrische Busse auf die Straße kommen (IPHE 2015).

Neben dieser Kaufprämie existiert jedoch noch kein explizites Förderprogramm und/oder Demonstrationsprojekt für BZ-Lkw in China. Allerdings sind einzelne Lkw-Hersteller bereits heute an der Technologie interessiert und aktiv, zum Beispiel China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd. (CNHTC), das laut der befragten Expertinnen und Experten plant, einen engl. „heavy duty truck“ für Hafentransporte zu bauen. Anzumerken ist, dass die MAN SE eine Beteiligung von 25 % an dem Tochterunternehmen SINOTRUK (Hong Kong) Ltd. der CNHTC hält und im Gegenzug Technologien an SINOTRUK lizenziert (SINOTRUK 2016).

Einzelne Projekte für BZ-Pkw und BZ-Busse laufen laut der befragten Expertinnen und Experten bereits und somit stimmt diese Aussage auch mit der Beobachtung überein, dass sich in China großes Engagement bei BZ-Bussen zeigt, zum Beispiel im „China Fuel Cell Vehicle Joint Demonstration Project“, in dem sich zum Beispiel das Bushersteller-Unternehmen Zhengzhou Yutong Group Co., Ltd. engagiert (Yutong 2015). Die Brennstoffzellentechnologie dazu wird allerdings oft weitgehend von außen eingekauft und in die im eigenen Land produzierten Fahrzeuge integriert (Ballard 2015).

Tabelle 5: Staatliche Subventionen für BZ-Pkw und BZ-Busse (IPHE 2015)

Brennstoffzellenfahrzeugtyp	Subventionsstandards (Einheit: RMB/Stück)
Personenkraftwagen (Pkw)	200.000
Leichte Pkw, Vans	300.000
Große und mittelgroße Busse, mittelgroße und schwere Lkw	500.000

Im Rahmen des H<sub>2</sub>Mobility-Kongresses haben Bundesminister Alexander Dobrindt und der chinesische Verkehrsminister Wan Gang über eine Zusammenarbeit beider Länder auf diesem Zukunftsfeld beraten (BMVI 2016). In diesem Rahmen wurde auch eine gemeinsame Absichtserklärung zwischen der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) und dem China Automotive Technology and Research Center (CATARC) über die Vertiefung der Zusammenarbeit auf dem Gebiet innovativer Antriebstechnologien und Infrastruktur unterzeichnet. Kooperiert wird bereits im Kontext der Modellregionen in beiden Ländern, nun sollen ggf. auch Demonstrationsprojekte gemeinsam durchgeführt werden.

## Deutschland

In Deutschland zeigt sich, dass es zwar große Förderprogramme nicht nur zur Förderung von Brennstoffzellentechnologie, sondern auch von den entsprechenden Anwendungen gibt, dass sie aber in Hinblick auf BZ-Lkw noch nicht bzw. kaum von der Industrie wahrgenommen werden.

Die Förderung von „schweren“ BZ-Fahrzeugen lief bisher im Rahmen des „Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“ (Laufzeit: 2007-2016, Volumen: 1,4 Mrd. Euro), für dessen Koordination und Steuerung die NOW GmbH zuständig ist (PTJ 2011). BZ-Lkw finden Erwähnung in Kapitel 3 des „Nationalen Entwicklungsplans – Version 3.0“, dem „Entwicklungsplan „Verkehr““: „Den individuellen Anforderungen von Pkw, Bus und Nutzfahrzeugflotten soll dabei jeweils Rechnung getragen werden.“ bzw. „(Der „Entwicklungsplan „Verkehr“,) umfasst FuE-Arbeiten sowie Demonstrationsaktivitäten für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge für den Straßenverkehr (Pkw und Flottenfahrzeuge, wie z. B. Busse).“ Letzteres könnte quasi auch „wie z. B. Lkw“ beinhalten. Dazu umfasste die Förderung wie in den USA vor allem Anwendungen der Logistik, Lagertechnik-Fahrzeuge (zum Beispiel Gabelstapler, Cargo-Schlepper, Flurförderzeuge, Hubwagen, Förderbandwagen), aber auch Sonderfahrzeuge (zum Beispiel Servicefahrzeuge, Kommunale Fahrzeuge/Reinigungsfahrzeuge), die laut Kapitel 7 des Entwicklungsplans, „Spezielle Märkte“, gefördert werden (PTJ 2011).

Im April 2016 wurde eine umfassende Wasserstoffstrategie vorgestellt, welche die folgenden Kernelemente beinhaltet (BMVI 2016):

- Investitionen: Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II) mit dem Ziel, die Kontinuität in Forschung und

Entwicklung zu gewährleisten und die Mobilität mit Wasserstoff- und Brennstoffzellen wettbewerbsfähig im Markt zu etablieren (Laufzeit: 2016-2018, Volumen: 161 Mio. Euro),

- Kooperationen: Bis 2023 sollen, parallel zum Fahrzeughochlauf, insgesamt bis zu 400 Wasserstofftankstellen in Deutschland verfügbar sein. Mit der Gründung des branchenübergreifenden Unternehmens H<sub>2</sub> Mobility Deutschland hat die Industrie die Weichen für den stufenweisen Ausbau des bundesweiten Wasserstoff-Tankstellennetzes gestellt (Laufzeit: 2016-2023, Volumen: 350 Mio. Euro),
- Innovationen: Mit einer neuen Förderrichtlinie zur Marktaktivierung sollen Innovationen gefördert werden wie beispielsweise Sonderfahrzeuge in der Logistik, autarke Stromversorgung für kritische oder netzferne Infrastrukturen sowie Anlagen zur Erzeugung strombasierter Kraftstoffe. Die Details der Förderrichtlinie werden derzeit erarbeitet.

Darüber hinaus wurde die Brennstoffzelle bisher schon explizit in der „Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS)“ aufgeführt (MKS 2013). Als Handlungsfelder liegen hier vor:

- Branchenübergreifende Zusammenarbeit zwischen Industrie und Politik, wie sie die NPE und das NIP charakterisieren, setzen Beispiele. Die Aktivitäten und erzielten Erfolge legen daher eine Fortführung und Weiterentwicklung dieser Initiativen nahe.
- Die spezifische Forschungs- und Entwicklungsförderung im Bereich batterieelektrischer Antriebe wird unter Wahrung der bestehenden Ressortzuständigkeiten fortgeführt. Die Unterstützung der Marktaktivierung batterieelektrischer Fahrzeuge und Mobilitätsformen soll als Schwerpunktthema gemeinsamer Initiativen von Politik und Industrie ausgebaut werden.
- Die Bundesregierung wird zusammen mit Industrie und Wissenschaft die Innovations- und Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland fortsetzen und im Rahmen des NIP unterstützen. Das besondere Augenmerk gilt dabei der Marktaktivierung.
- Zur Unterstützung der Marktvorbereitung und zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit mit anderen Alternativen wird die Bundesregierung prüfen, ob und gegebenenfalls welche Schritte einzuleiten sind, um die Markteinführung von Wasserstoff als Kraftstoff, der in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt wird, zu unterstützen.
- Die Bundesregierung wird ihre Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet von Energiespeichern in Deutschland weiter verstetigen und entsprechende Aktivitäten von Wissenschaft und Industrie unterstützen.

Insgesamt ist damit festzuhalten, dass insbesondere mit dem NIP bzw. mit dem NIP II im internationalen Vergleich hervorragende Rahmenbedingungen (siehe Budget und Laufzeit) vorliegen, aber bisher einfach die industrielle Initiative fehlte, Projektskizzen zu entwickeln und einzureichen. Alle großen Lkw-Hersteller „hängen“ laut der befragten Expertinnen und Experten von der technologischen Entwicklung her an Pkw-OEM und dort liegt die Priorität wiederum eindeutig auf den BZ-Pkw, weshalb nicht mehr bleibt, als die großen Potentiale des Transfers von BZ-Pkw über BZ-Busse in BZ-Lkw herauszustellen.



Dieses Potential, bestehendes Wissen von BZ-Pkw und BZ-Bussen in die FuE von BZ-Lkw zu übertragen, wird in Deutschland bisher noch nicht wirklich ausgenutzt bzw. es ist nichts darüber bekannt. Die Niedrigpriorisierung von BZ-Lkw hat allerdings auch Gründe, die festzuhalten sind: Beschränkte Ressourcen bzw. FuE-Budgets sowie BZ-Pkw mit dem größten Marktpotential (und große Synergien mit den schon weit fortgeschrittenen Elektrofahrzeugen – elektrifizierte Lkw liegen noch weit zurück).

Die fachlich-inhaltliche Prüfung und Vorauswahl von Demonstrationsprojekten würde durch die NOW GmbH erfolgen. Auch in den Dokumenten zur oben genannten, derzeit in Entwicklung befindlichen Förderrichtlinie zur Marktaktivierung werden insbesondere BZ-Nutzfahrzeuge zum Beispiel für den Lieferverkehr berücksichtigt, um FuE-Aktivitäten in diesem Bereich anzuregen bzw. zu stärken. Die „politische“ Selbstverpflichtung ist damit in Deutschland vorhanden.

Es gibt noch weitere öffentliche Bekanntmachungen, in denen die BZ immer wieder für sehr spezifische Anwendungen berücksichtigt wird. Dazu kommen europäische Förderprogramme, zum Beispiel das „Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking“ (FCHJU) oder hinsichtlich dem „erneuerbaren“ Verkehrsinfrastrukturaufbau das „Trans-European Transport Network“ (TEN-T) sowie „Connecting Europe Facility“ (CEF). Es ist hier sehr wichtig, diese Programme der deutschen Industrie immer wieder zu kommunizieren. Nur wenn sie diese Programme aktiv wahrnimmt, kann die Bundesregierung weitere Schritte veranlassen und ggf. mehr bzw. breitere Förderung veranlassen. Hier zeigt sich deutlich, dass vor allem ein besserer Informationsaustausch nötig ist, um die vorhandene Entwicklungsbasis voll zu nutzen. Ziel von weiteren Anstrengungen muss zunächst, wie angesprochen, eine bessere Kommunikation zwischen den Akteuren sein, um vorhandene Potentiale besser zu nutzen. In Summe befindet sich Deutschland laut den befragten Expertinnen und Experten im weltweiten Vergleich in einer guten Position, die sich aber mit relativ wenig Aufwand weiter ausbauen lässt.

Es fehlt im Moment also vor allem die „industrielle“ Selbstverpflichtung, sich nachhaltig bzw. verbindlich und umfassend in der FuE von BZ-Lkw zu engagieren. Dazu kommt der Bedarf der Etablierung einer für BZ-Lkw kompatiblen Wasserstoffinfrastruktur. Das übergeordnete Ziel der Fahrzeughersteller ist es, das heutige Logistiksystem aufrecht zu erhalten, und auch aufgrund der Kundenanforderungen sind keine Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit der BZ-Lkw in Kauf zu nehmen, bei gleichzeitiger Einsparung der Emissionen. Eine abschließende Technologieauswahl hat deshalb noch nicht stattgefunden bzw. ist nicht vorgesehen – es gewinnt die jeweils beste Technologie für jede Anwendung (zum Beispiel den Verteil- oder Fernstreckenverkehr).

Die befragten Expertinnen und Experten rechnen fest damit, dass in Zukunft auch Fahrzeughersteller wie die Daimler AG oder Toyota Motor Corporation auf den Plan treten und ihre großen Erfahrungen/Lessons Learned in der engl. „vehicle integration“ von (nicht zuletzt gerade elektrischen) Antriebssystemen als Basis nehmen, um BZ-Lkw demonstrati-

onsfertig herzustellen. Dass dies noch nicht geschehen ist, kann eigentlich nur durch eine bewusste Entscheidung dagegen zu erklären sein, ggf. angesichts der vorher zu lösenden Infrastrukturproblematik – theoretisch/praktisch möglich wäre es den großen Fahrzeugherstellern schon heute.

## Japan

Die starke sowohl „industrielle“ als auch „politische“ Selbstverpflichtung Japans zur FuE sowie Marktanwendung von Brennstoffzellen in der Elektromobilität (BZ-Pkw und BZ-Busse) ist noch nicht auf BZ-Lkw ausgeweitet worden (Abbildung 21 zur japanischen Organisation der Förderinstitutionen): Es gibt aktuell keine Förderprogramme und/oder Demonstrationsprojekte für BZ-Lkw in Japan. Der Fokus liegt im Moment noch auf dem erfolgreichen Markthochlauf von BZ-Pkw sowie Demonstrationsprojekten für BZ-Busse, BZ-Gabelstapler und einige hoch spezialisierte Fahrzeuganwendungen wie Müllverdichtungsfahrzeuge. Das japanische Umweltministerium betreibt einige Förderprojekte mit einem BZ-Bus in Zusammenarbeit mit Hino Motors Ltd., einen BZ-Gabelstapler mit der Toyota Industrie Corporation sowie ein BZ-Schiff mit der Toda Corporation (MoE 2014). Ähnlich wie in China sind auch japanische Fahrzeughersteller an der Brennstoffzellentechnologie interessiert und planen die FuE von BZ-Lkw ein, aber die öffentliche Unterstützung fehlt in diesem Bereich noch vollständig.

Um die FuE sowie die Kommerzialisierung von BZ-Pkw weiter voranzutreiben, hat die japanische Regierung eine Reihe von Subventionen beschlossen, die relativ hoch ausfallen. So soll jeder Fahrzeugkauf mit bis zu drei Millionen Yen bezuschusst werden, was etwa 23.655 Euro entspricht (Stand: 04.04.2016). Eine Beispielrechnung zeigt, dass der ab Beginn 2015 angebotene Toyota Mirai mit einem Preis von sieben Millionen Yen nach Abzug der direkten Subventionen nur noch vier Millionen Yen bzw. umgerechnet 55.195 Euro kostet (Stand: 4.04.2016), was ein weitaus attraktiveres Angebot darstellt (Reuters 2014).

Es fällt auf, dass Japan bzw. das METI (und NEDO) auf Roadmaps etc. immer alle Anwendungen aufzeigen, auch wenn die eigentliche Strategie eher gleich ist wie die in Deutschland: BZ-Pkw heute bzw. 2015, BZ-Busse morgen bzw. 2016, BZ-Lkw am Horizont bzw. um 2030 (Abbildung 22). Besonders die Olympiade (Tokio 2020) bzw. die damit zusammenhängenden Lieferverkehre könnten aber einen starken Treiber für BZ-Lkw in Japan darstellen. Eine Reihe von Demonstrationsprojekten mit zum Beispiel Gabelstaplern oder Sonderfahrzeugen sowie BZ-Bussen wurde schon in der Vergangenheit durchgeführt (zum Beispiel „FCHV-BUS2 fuel cell hybrid bus at EXPO 2005 Aichi“), wobei explizit auf Technologie bzw. Erfahrung der Toyota Motor Corp. zurückgegriffen wird (Expo 2005).

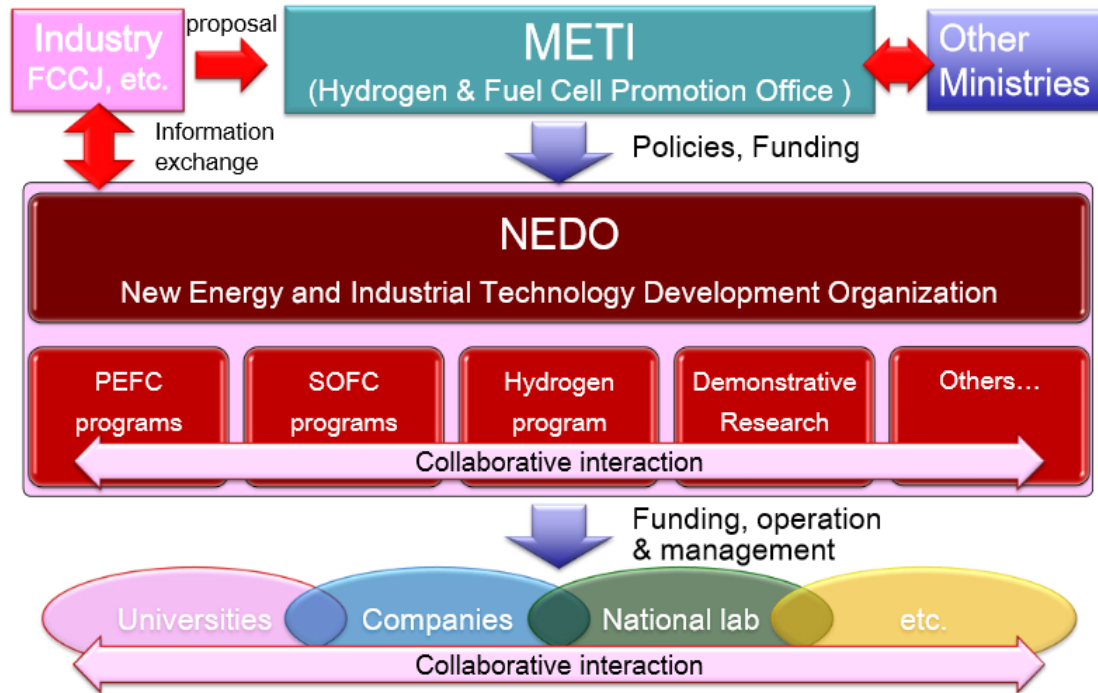


Abbildung 21: Übersicht über die politische Verankerung des Themas der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie unter dem METI in Japan (IPHE 2016)

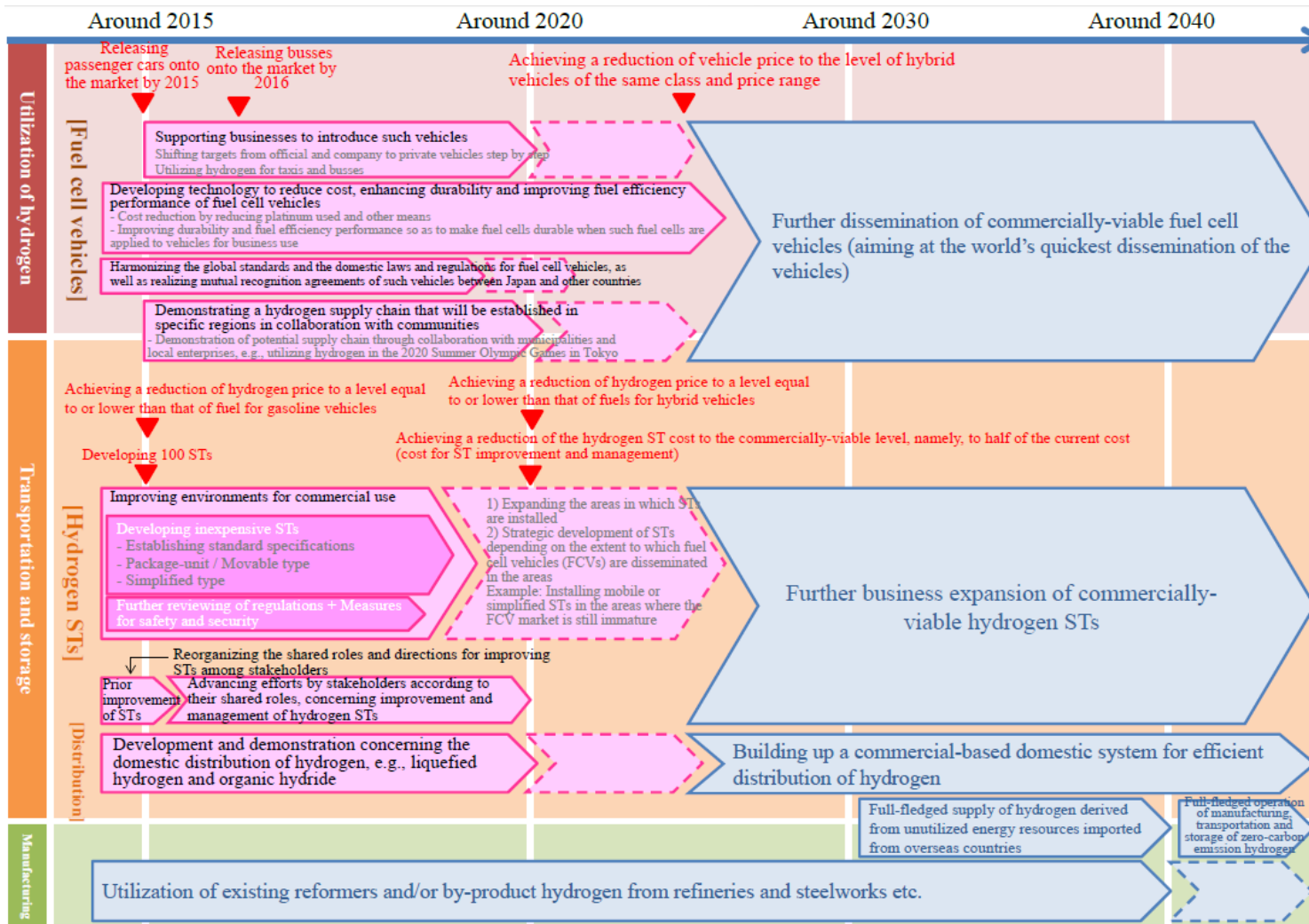


Abbildung 22: Zusammenfassung der strategischen Roadmap für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Graph 4 für Brennstoffzellen-Fahrzeuge und Wasserstoffspeicherung in Tanks) (METI 2014)

## USA

Bei der Betrachtung der Aktivitäten in den USA ist zunächst auf die starken Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesstaaten aufgrund des stark föderalen Charakters der USA hinzuweisen. Die unumstrittene Vorreiterrolle Kaliforniens ist durch die strenge ZEV-Regulierung und schiere Marktgröße entscheidend dafür, dass es die staatliche Gesetzgebung in den USA beeinflusst, weshalb sich praktisch alle Fahrzeughersteller daran orientieren müssen, wenn sie dort ihre Fahrzeuge verkaufen möchten. Bei den Elektrofahrzeugen ist ihr Einfluss bereits zu sehen, bei den Lkw noch nicht – was sich nach und nach ändern wird, wenn auch die Marktgröße stückzahlenmäßig natürlich kleiner ausfällt und deshalb die BZ-Lkw durch die BZ-Pkw getrieben werden.

Ein Problem in Kalifornien war die Insolvenz des Unternehmens Vision Industries Corporation (engl. „developer of zero emission electric/hybrid powered vehicles and turnkey hydrogen fueling systems“) (WSJ 2014), das hinsichtlich der BZ-Lkw große Versprechungen gemacht hatte. Die heute noch im Markt befindlichen Fahrzeughersteller müssen diese vor allem bei der öffentlichen Hand erst einmal korrigieren, um weitere Förderprogramme und Projekte für FuE bewilligt zu bekommen. Das Unternehmen wird auch von anderen Marktteilnehmern als eine Art „Negativbeispiel“ genannt, um die Gefahren des frühen Einstiegs in die Technologie bzw. BZ-Lkw zu verdeutlichen. Das Unternehmen spezialisierte sich früh auf die Entwicklung und den Vertrieb von BZ-Lkw, welche sich jedoch nicht auf dem Markt bewähren konnten. Als Grund wurde von den befragten Expertinnen und Experten eine zu niedrige Motorisierung genannt, durch welche die Anwendungsmöglichkeiten stark eingeschränkt waren. Diese Aussagen lassen den Schluss zu, dass ein Engagement in der Zukunft wohl vor allem durch etablierte Unternehmen umgesetzt wird, die durch Diversifikation und Finanzkraft auch erste Durststrecken überbrücken können. Für ein neues Unternehmen stellt die alleinige Beschränkung auf BZ-Lkw ein vermutlich zu hohes unternehmerisches Risiko dar, was kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) als potentiell neue Marktteilnehmer eher abschrecken wird.

Andere potentielle Hersteller von BZ-Lkw, Freightliner Trucks als eingetragene Marke der Daimler Trucks North America LLC (Daimler 2016) und Paccar Inc. (Paccar 2016) tauchen bisher in öffentlichen Demonstrationsprojekten noch nicht auf. Die wirklich aktiv verfolgten Anwendungen sind im Moment die Umfuhr-Lkw in Häfen, Gabelstapler, engl. „yard trucks“ bzw. kleine Kurzstrecken-Lkw für Speditions- und Logistikhöfe und engl. „garbage trucks“ bzw. Müllautos. Dazu kommen Nischenanwendungen wie zur Herstellung von Kühlungsenergie eingesetzte Brennstoffzellen auf Lkw (Daily Fusion 2013) oder engl. „barges“ wie in Honolulu/Hawai (Power 2014), üblicherweise, um die mit Diesel betriebenen Stromgeneratoren von Kühl-Lkw oder großen Schiffen zu entlasten. Einige OEM profitieren bereits heute von Anreizen zu engl. „fuel efficient vehicles“ bzw. BZ-Pkw auf Bundesstaats-Ebene, auch ausländische wie die Hyundai Motor Company bzw. Hyundai Kia Automotive Group. Maßnahmen gehen hier bereits hin zum engl. „deployment“ bzw. zur

Massenproduktion dieser Fahrzeuge in bzw. ab dem Jahr 2020. Auch Honda hat einen BZ-Pkw geplant, der bereits zum Leasing für eine begrenzte Anzahl von Kunden verfügbar war.

In Kalifornien sind die California Energy Commission (CEC) mit ihrem engl. „Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program“ (CAEC 2016) sowie das California Air Resources Board (CARB) der California Environmental Protection Agency (CEPA) aktiv. Das CARB ist in seiner Arbeit nicht ausschließlich auf Kalifornien beschränkt, es arbeitet auch am nationalen Gesetzgebungsprozess mit, wo mehr und mehr Mittel direkt zur Demonstration von BZ-Anwendungen eingesetzt werden sollen. Zur Demonstration gibt es schon Projekte, wie zum Beispiel das „Hydrogenics Advanced Fuel Cell Vehicle Technology Demonstration for Drayage Truck“ der Hydrogenics USA Inc. unter anderem in den Häfen von Los Angeles (SoC 2013). Dazu kommen nationale Förderprogramme des DOE, siehe „DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record“ (DoE 2015). Das CARB hat in Kalifornien im Oktober 2015 den sogenannten Aufruf zu „Zero-Emission Truck and Bus Pilot Commercial Deployment Projects“ herausgegeben (CARB 2015-1), welcher 23.658.500 Mio. US-Dollar umfasste und am 29. Januar 2016 mit 38 Bewerbungen über ein Gesamtvolumen von über 300 Millionen US-Dollar schloss. Daran ist eindeutig abzulesen, wie groß zum einen das Engagement der Industrie ist und zum anderen wie groß der Bedarf nach entsprechender Förderung. Es geht hier insgesamt weniger um FuE als vielmehr die Demonstration von Pilotfahrzeugen, gerade im Bereich der engl. „heavy-duty vehicles“. Einen guten Überblick über die geförderten Technologien gibt das „Draft – Technology Assessment – Medium- and Heavy-Duty Fuel Cell Electric Vehicles“ (CARB 2015-2).

Im Rahmen des „Air Quality Improvement Program (AQIP)“ gibt es ein sogenanntes „Clean Vehicle Rebate Project“ (CARB 2016-1), das mit bis zu 200 Mio. US-Dollar ausgestattet ist und die Markteinführung auch von FCEV voranbringen soll (CARB 2015-3). Diese Mittel sollen im nächsten fiskalischen Jahr ab 1. Juli 2016 sogar auf bis zu 500 Mio. US-Dollar ausgebaut werden, also engl. „low-carbon transportation funds“ unter dem sogenannten „Cap-and-Trade Program“ (CARB 2016-2). Dazu kommt das „Multi-Source Facility Demonstration Project“ des CARB, für das ursprünglich auch 23.658.500 Mio. US-Dollar vorgesehen waren und das auf viel mehr Nachfrage gestoßen ist (CARB 2015-4). Hervorzuheben ist der ganzheitliche Ansatz der Umsetzung, wo für den Markt vielversprechende Anwendungsfälle dargestellt werden sollen: Beispiel hierfür kann ein Hafen sein, bei dem sowohl die Gabelstapler als auch verschiedene Arten von Logistikfahrzeugen und Lkw mit Brennstoffzellen ausgestattet sind. Dementsprechende Demonstrationsprojekte finden an den San Pedro Bay Ports in der Nähe von Los Angeles statt (Abbildung 23) (CTE 2016).



Abbildung 23: Abbildung eines BZ-Lkw mit Einsatzbereich Hafen in einem US-amerikanischen Demonstrationsprojekt (CTE 2016)

Eine wichtige Feststellung ist, dass in allen Programmen mit ZEV-Schwerpunkt bei der Fördermittelvergabe nicht die Wahl der Technologie vorgeschrieben wird, diese Entscheidung darf der freie Markt treffen, also die Unternehmen, welche Projektskizzen einreichen. Demnach muss die BZ mit den anderen Elektrofahrzeug-Modellen konkurrieren. Vorteil ist dadurch, dass Fördermittel vor allem in Projekte und damit Technologien fließen, von denen sich Unternehmen ein Marktpotential erhoffen. Fehlinvestitionen in Technologien mit geringen Erfolgsaussichten werden so teilweise minimiert. Auf der anderen Seite werden allerdings FuE von Technologien mit hohen initialen Grundinvestitionen vernachlässigt, da diese sich kurzfristig nicht profitabel gestalten, gerade in Hinblick auf die in amerikanischen Unternehmen vorherrschende eher kurzfristige Sichtweise. Deshalb wird es in den nächsten ein bis zwei Jahren eher darum gehen, emissionsfreie Elektromobilität auf den kurzen und regionalen Strecken zu demonstrieren, um die BZ-Technologie Schritt für Schritt voran und auf die Agenda der entsprechenden nationalen Fördereinrichtungen wie zum Beispiel die US Environmental Protection Agency zu bringen. Langfristig ist es das Ziel des CARB, auch Strecken die über den Bundesstaat hinausgehend mit BZ-Lkw zu realisieren.

Dazu kommt ein Problem zur Demonstration von Sattelzugmaschinen für Fernstrecken über US-amerikanische Bundesstaatsgrenzen hinweg, denn die Infrastruktur steht hier noch nicht zur Verfügung bzw. die BZ-Lkw-Betreiber müssten die Sattelzugmaschine wechseln, da es abseits von bestimmten Strecken keine Wasserstoffinfrastruktur gibt.

Außerdem muss laut den befragten Expertinnen und Experten an der öffentlichen Wahrnehmung von BZ-Technologie gearbeitet werden, die als gefährlich gilt – in den USA denken einige Leute im Zusammenhang mit „Wasserstoff“ immer noch an den Hindenburg-Unfall. Es ist allerdings zu erwarten, dass sich dies mit der zunehmenden Verbreitung von BZ-Pkw ändern wird.

## **2.2.4 Stärken und Schwächen der der Länder**

### **China**

Für China stellt sich grundsätzlich die Frage, ob sich BZ-Fahrzeuge allgemein auf dem Markt etablieren können, geschweige denn, dass es BZ-Lkw schaffen. Weil die Kosten für die landesweite Einrichtung einer Wasserstoffinfrastruktur als zu hoch gelten, liegt der Fokus ihrer Verbreitung eher auf städtischen Gebieten bzw. Metropolregionen. Der Markthochlauf verlief selbst nach den öffentlichkeitswirksamen Demonstrationsprojekten bei den Olympischen Spielen in Peking 2008 und der Weltausstellung in Shanghai 2010 äußerst schleppend, was auch die jüngst besseren Nachrichten kaum verbergen können (Clean Technica 2015). Weil die Technologie im konkreten Fall aus dem Ausland nach China geliefert wird, ist mit einer Vorreiterrolle Chinas nicht zu rechnen.

### **Deutschland**

In Interviews mit internationalen Expertinnen und Experten wird Deutschland auch in Bezug auf BZ-Fahrzeuge allgemein ein hohes Potential zugesprochen, was vor allem auf die hervorragend positionierte Automobilindustrie zurückzuführen ist. Mit der Daimler AG und Volkswagen AG sind zwei der weltweit erfolgreichen, größten Lkw-Hersteller in Deutschland angesiedelt, welche zudem bereits an BZ-Pkw forschen. Durch einen erfolgreichen Transfer von bestehendem Wissen im Bereich der BZ-Pkw und BZ-Busse auf BZ-Lkw könnte sich Deutschland so im weltweiten Vergleich zu einem Technologieführer durchsetzen.

Kurz- bis mittelfristig ließe sich großes Potential durch eine bessere Kommunikation zwischen politischer und industrieller Seite realisieren. Die bestehenden Missverständnisse wurden in der unterschiedlichen Auffassung von bestehenden Förderprogrammen deutlich, die eine Förderung von FuE an sowie Demonstrationsprojekte von BZ-Lkw ermöglichen, aber kaum wahrgenommen werden. Wie sich durch die Vielzahl an Bewerbungen für Fördermittel des kalifornischen Aufrufes zur „Zero-Emission Truck and Bus Pilot Commercial Deployment Projects“ zeigt, besteht ein hohes Interesse der Industrie. Die beiden Vertreter des CARB haben auch die Ansicht geäußert, dass das Interesse an der Technologie in letzter Zeit beständig zugenommen hat und es mit einem Anstieg der entsprechenden Anfragen begründet.



Als weiterer Standortvorteil Deutschlands kann die Initiative H<sub>2</sub> Mobility Deutschland angesehen werden (H<sub>2</sub> Mobility 2016). Wenn das selbstgesteckte Ziel erreicht wird, bis 2023 ein flächendeckendes Netz von 400 Wasserstofftankstellen aufzubauen, gäbe es eine solide Wasserstoffladeinfrastruktur für eine Vielzahl von Anwendungsfällen. Hierbei sollte versucht werden, bereits in der heutigen Anfangsphase an den späteren Einsatz von BZ-Lkw zu denken und die Wasserstoffinfrastruktur dafür kompatibel aufzubauen. Ansonsten könnte sich die fehlende Kompatibilität zu einem der größten Hindernisse für die erfolgreiche Etablierung der BZ-Lkw entwickeln.

## Japan

Die großen Anstrengungen Japans in Bezug auf die Brennstoffzellentechnologie sind direkt mit dem Ziel der einheimischen Automobilindustrie verbunden, einen globalen Wettbewerbsvorsprung zu gewinnen. Durch die Zusammenarbeit mehrerer Industriesektoren verfolgt Japan das Ziel einer technischen Marktführerschaft gegenüber der Konkurrenz in Europa und den USA, die erneut über viele Jahre anhalten soll. Um diese Marktführerschaft voll auszunutzen, würde aufgrund der recht einfachen technischen Übertragbarkeit von BZ-Pkw ggf. über BZ-Busse auch ein stärkeres Engagement im Bereich BZ-Lkw als logisch erscheinen.

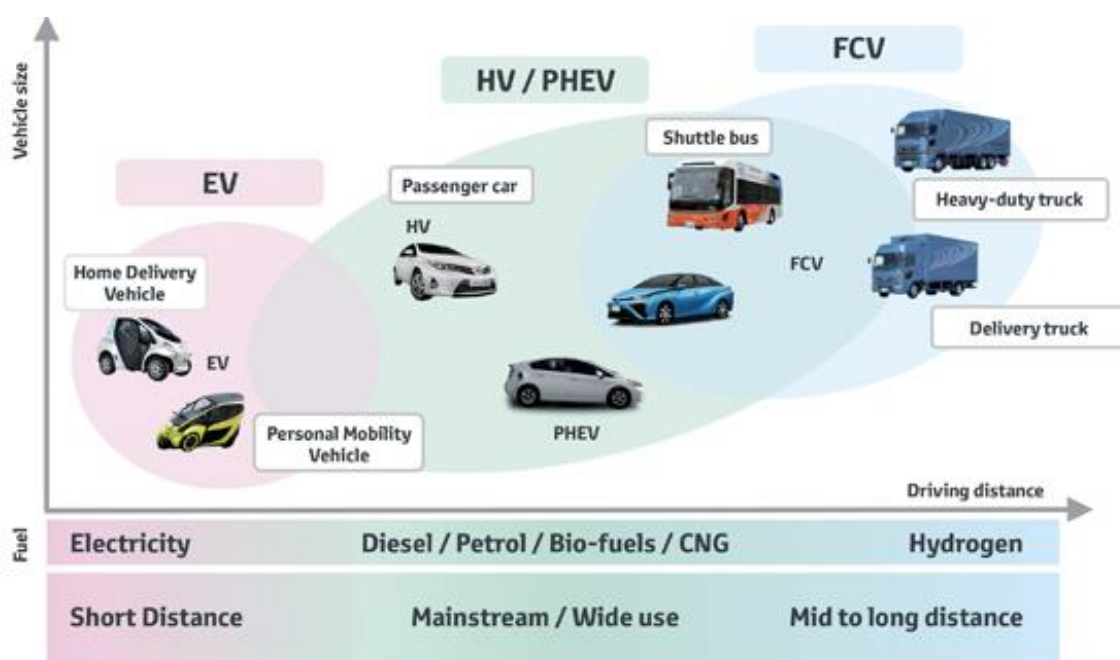


Abbildung 24: Die Toyota-Roadmap zu den Antriebstechnologien der Zukunft: „für jeden Einsatzzweck die geeignete Antriebsart“ (Toyota 2014)

Mit der Toyota Motor Corp. befindet sich einer der weltweiten Pioniere für BZ-Pkw bzw. ein Schlüsselakteur der Automobilindustrie in Japan. Hino Motors Ltd. hat als Tochtergesellschaft der Toyota Group das größte Potential, bestehendes Wissen von BZ-Pkw und

BZ-Bussen in die FuE von BZ-Lkw zu übertragen. Die Zukunftsvision der Toyota Motor Corp. (Abbildung 24) zeigt, wo das Unternehmen die Brennstoffzellenfahrzeuge in Zukunft einordnet: Insbesondere bei Fahrzeugen, die für Langstrecken eingesetzt werden, was auch BZ-Lkw im Lieferverkehr sowie engl. „heavy-duty trucks“ bzw. den Schwerlastverkehr mit einschließt.

Auch wenn bislang keine (offiziellen) Aktivitäten im Bereich der BZ-Lkw zu verzeichnen sind, muss Japan deshalb aufgrund seines bestehenden Engagements bei BZ-Pkw schon heute als möglicher Schlüsselakteur eingestuft werden. Spätestens, wenn Industrie und Politik ihr Engagement in diesen Bereich ausdehnen, wozu sich zum Beispiel bei den Olympischen Spielen in Tokio 2020 eine hervorragende Gelegenheit in Zusammenhang mit den dort eingesetzten Lieferverkehren anbietet, könnten Japans heutige Aktivitäten rund um BZ-Pkw einen starken Treiber für BZ-Lkw darstellen.

## USA

In den USA ist vor allem die Vorreiterrolle Kaliforniens hervorzuheben, die Förderung der BZ-Technologie auf Bundesebene fällt deutlich geringer aus. Durch eine strenge ZEV-Gesetzgebung in Kalifornien mit dem Ziel der Begrenzung von Schadstoffemissionen werden Entwicklungen durch die Industrie nicht nur begünstigt, sondern regelrecht erzwungen. Den Lkw kommt dabei aufgrund ihrer relativ hohen Emissionen eine immer größere Aufmerksamkeit zu, die sich in den nächsten Jahren noch verstärken könnte. Aufgrund der technologieneutralen Ausrichtung der Förderung ist jedoch nicht abzusehen, ob und wie bzw. wie schnell eine Etablierung von BZ-Lkw stattfinden wird.

Hinsichtlich der BZ-Lkw fehlen laut der befragten Expertinnen und Experten aktuell noch Erfahrungswerte, die verlässliche Abschätzungen über den langfristigen Erfolg und die Sinnhaftigkeit dieses Einsatzbereichs von Brennstoffzellen erlauben. Dies ist auch der Grund, dass es bislang noch keine langfristige politische Strategie gibt. Aktuelles Ziel ist es deshalb, durch Pilotprojekte erste Erfahrungen im Einsatz von BZ-Lkw zuerst in der Kurz-, und später auch in Regional- bzw. Fernstrecke zu sammeln. Um diesen Prozess zu beschleunigen, soll möglichst viel gesammeltes Wissen aus Demonstrationsprojekten mit BZ-Pkw, BZ-Bussen und BZ-Lkw zwischen den Anwendungen übertragen werden. Zusätzlich muss an einem umfassenden Geschäftsszenario gearbeitet werden, welches Eintrittsbarrieren für OEM und potentielle Kunden zur Beseitigung identifiziert, zu erreichende Kostenziele definiert sowie die Errichtung einer entsprechenden Wasserstoffinfrastruktur berücksichtigt.

Als Schwäche wurde durch die befragten Expertinnen und Experten hervorgehoben, dass sich die Reihenfolge der umzusetzenden Prioritäten auf jährlicher Basis mit der (Neu-) Vergabe von Fördermitteln ändert. Das Problem ist, dass die wechselhafte öffentliche Unterstützung auch dazu führt, dass sich die jeweiligen Lkw-Hersteller nicht öffentlich zu der Brennstoffzellentechnologie bekennen und sowieso nicht über ihre Aktivitäten bezüg-

lich BZ-Lkw sprechen, wenn potentielle Konkurrenz in der Nähe ist. Hier wird noch einige Überzeugungsarbeit zu leisten sein. Interessant ist auch die Feststellung, dass wesentlich mehr öffentliche Unterstützung für die Wasserstoffinfrastruktur der BZ-Lkw als ihre FuE notwendig sein wird und diese wesentlich teurer ausfällt als die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge (Zitat engl. „infrastructure is an issue“).

### 2.3 Fazit zum Stand der Forschung und Entwicklung von BZ-Lkw

Wie die Gespräche mit den befragten Expertinnen und Experten gezeigt haben, steigt das Interesse an BZ-Lkw stetig an und erste Aktivitäten sind nicht nur in der Industrie, sondern auch in der Politik hinsichtlich entsprechender Fördermaßnahmen festzustellen. Es gibt jedoch große Unterschiede zwischen den analysierten Ländern: Während Deutschland und Japan ein sehr großes Entwicklungspotential zugerechnet werden kann, hinken China und die USA mit Ausnahme des im weltweiten Vergleich führenden Kaliforniens deutlich hinterher (Tabelle 6), vor allem eine BZ-Lkw-Strategie betreffend. In Deutschland ist dies der stark aufgestellten Automobilindustrie sowie einem erkennbaren politischen Interesse zuzurechnen. In Japan liegt dies in dem bereits sehr hohen Engagement im Bereich der Brennstoffzellentechnologie begründet (siehe Abschnitt 2.1).

Tabelle 6: Zusammenfassung der quantitativen und qualitativen Analyse über alle analysierten Länder (plus Korea) hinweg

Länder	Publ. (Status quo & Trend)	Patente (Status quo & Trend)	Demonstrationsprojekte (zu BZ-Lkw)	Politisches Interesse	Flächen-deckende Infrastruktur
USA	+++ & →	+++ & ↓	Wenige	+ (in CA ++)	Schwierig
Korea	0 & ↑	0 & ↑	- (keine konkreten Projekte)	0	Neutral
China	++ & ↑	0 & ↑	- (keine konkreten Projekte)	0	Schwierig (Fokus auf Metropolen)
Japan	+ & ↓	++ & ↑	- (keine konkreten Projekte)	0	Einfacher
Deutschland	+ & →	+ & →	Sehr wenige	+	Einfacher

Legende: 0 = keine(s) bzw. nicht sichtbar; + gering bzw. erkennbar; ++ vgl. hoch bzw. deutlich; +++ sehr stark. Die Pfeile geben eine zukünftige Tendenz an.

Der Befund lässt sich vor dem Hintergrund der qualitativen Analyse auch aus den Publikationen und Patentanmeldungen der Länder herauslesen. Denn gerade mit Blick auf die anwendungsnahen Entwicklungen dokumentieren die Patentanmeldungen eine führende Position Japans mit hohen Patentanteilen bei BZ-Pkw und gleichzeitig hohem Wachstum im Bereich der BZ-Lkw und BZ-Busse. Deutschland liegt hier auf einem mittleren und gleichbleibenden Niveau. Für die USA konnte trotz hoher Patentanteile bei BZ-Nutz-

fahrzeugen ein deutlicher Rückgang der Anmeldungen festgestellt werden, China ist zwar bei Publikationen, nicht aber bei den Patentanmeldungen international sichtbar.

Im Bereich der BZ-Pkw ist bereits ein Trend hin zu Partnerschaften in FuE erkennbar, was Kosten und Risiken für die betreffenden Unternehmen minimiert: Während Daimler AG, Ford Motor Company und Nissan Motor Company an einem gemeinsamen Brennstoffzellensystem zur Markteinführung in BZ-Pkw im Jahr 2017 arbeiten, umfassen weitere Joint Ventures die Toyota Motor Corporation und BMW Group mit dem Ziel eines marktfähigen BZ-Pkw bis zum Jahr 2020, die Honda Motor Company und General Motors, die ebenfalls das Jahr 2020 nennen, sowie die Volkswagen AG, die mit dem kanadischen Brennstoffzellen-Hersteller Ballard Power Systems zusammenarbeitet (DoE 2014). Ähnliche Partnerschaften bieten sich auch bei BZ-Lkw an und könnten so die noch vorhandene Zurückhaltung zwischen den Herstellern beenden.

Ob und wie bzw. wie schnell sich BZ-Lkw langfristig auf dem Markt durchsetzen werden, ist mit den heute bekannten Aktivitäten nicht abschließend zu bewerten. Zu groß ist der Einfluss von politischen Entscheidungen, zum Beispiel hinsichtlich der notwendigen Investitionen hinsichtlich einer Wasserstoffinfrastruktur, aber auch die gleichzeitig fortschreitende Entwicklung von komplementären und konkurrierenden Technologien, mit denen sich Brennstoffzellen zum Einsatz in BZ-Lkw messen lassen müssen.

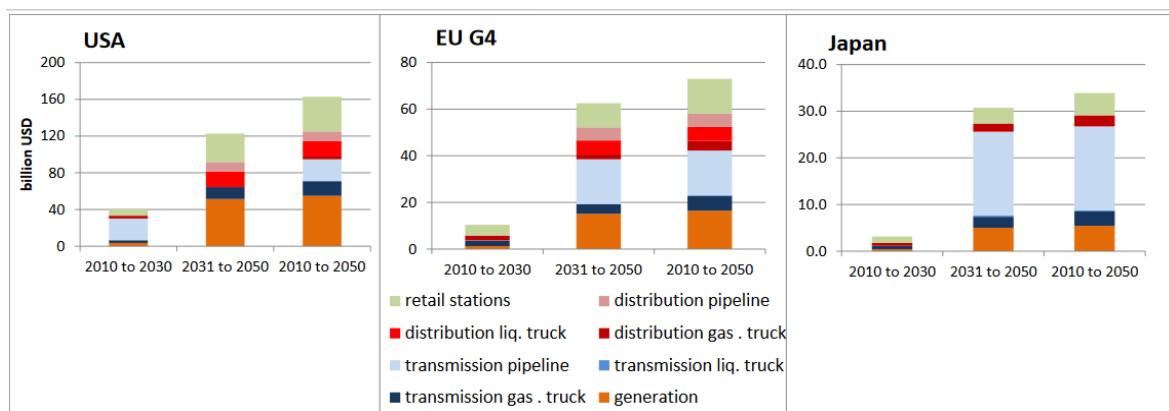


Abbildung 25: Prognose für kumulierte Kosten einer Wasserstoffinfrastruktur (IEA 2014)

Eine entscheidende Rolle für den Erfolg der Brennstoffzellentechnologie spielt die erfolgreiche Etablierung der Wasserstoffinfrastruktur. Die IEA hat in einer Modellrechnung die kumulierten Kosten für die Installation in Deutschland, Italien, Frankreich und Großbritannien (den sogenannten „EU G4“, Abbildung 25) beziffert. Eine einfache Normierung der Kosten auf die aktuellen Bevölkerungen zeigt bemerkenswert, dass die Kosten in den USA etwa doppelt so hoch ausfallen wie in den EUG4 und Japan, was als Hindernis für die Verbreitung auf dem Land in den USA angesehen werden kann und in der viel geringeren Bevölkerungsdichte begründet liegt. Die Interpretation der Daten zeigt, dass eine Wasserstoffinfrastruktur insbesondere in Ländern mit einer hohen Bevölkerungsdichte

zielführend ist, da sich hier die Kosten für die Installation in Grenzen halten, was zudem die hohe Motivation Japans bei der Etablierung von BZ-Pkw erklärt. Es sei deshalb grundsätzlich angemerkt, dass der langfristige Erfolg von Brennstoffzellenfahrzeugen eng an die Entscheidungen und Aktivitäten hinsichtlich der Wasserstoffinfrastruktur geknüpft ist. Darüber hinaus setzt der Erfolg von BZ-Lkw wiederum eine dazu kompatible Wasserstoffinfrastruktur voraus. Entsprechende Weichenstellungen müssen deshalb bereits heute getroffen werden, wobei in Deutschland mit der H<sub>2</sub>-Mobility-Initiative im internationalen Vergleich bereits erste Schritte zur Erfüllung dieser Ziele angestoßen wurden.

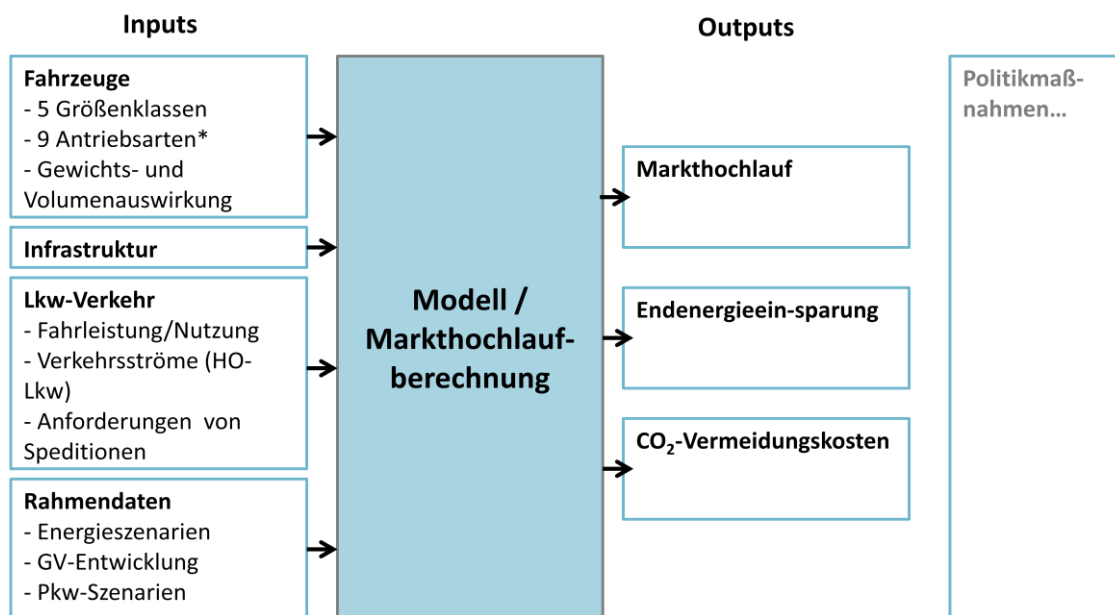


## 3 Marktpotential

### 3.1 Methodik

#### 3.1.1 Übersicht

Ziel der Markthochlaufberechnung ist, einen potentiellen Markthochlauf von alternativen Antrieben im Lkw-Bereich unter Annahmen zu den Rahmenbedingungen wie Energieträgerpreisen oder Ausbau der Infrastruktur abzuleiten. Dafür wird ein Modell entwickelt, das die Kaufentscheidung von Lkw-Betreibern unter Berücksichtigung der vielen Nutzungsarten von Lkw abbildet. Abbildung 26 zeigt schematisch die Rolle der Eingangsdaten und Ergebnisse des Modells.



\* Diesel, CNG/LNG, BEV, PHEV, FCEV, HO-Lkw (Dieselhybrid), HO-Lkw (vollelektrisch), Stromschienen-Lkw (vollelektrisch), Induktions-Lkw (vollelektrisch)

Abbildung 26: Anforderungen an das Modell

Das Modell baut auf das Fahrverhalten von ca. 5.800 Lkw anhand von öffentlich verfügbaren Daten auf und simuliert, welche Gesamtnutzungskosten (engl. Total Cost of Ownership – TCO) jeder einzelne Lkw mit verschiedenen Antriebsarten hätte. Dabei geht eine Reihe von Einflussfaktoren ein, wie die individuelle Jahresfahrleistung, der Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur und das Angebot an Lkw mit unterschiedlichen Antriebsarten.

Dabei wird im Modell zwischen neun Antrieben und fünf Größenklassen unterschieden. Die Berechnung des Markthochlaufs erfolgt in mehreren Schritten (vgl. Abbildung 27):

1. Berechnung der Gesamtnutzungskosten für jeden Lkw mit seiner Jahresfahrleistung für jeden Antrieb sowie Bestimmung des TCO-minimalen Antriebs.

2. Bestimmung des Anteils der Antriebsarten in den Größenklassen.
3. Da das Modellangebot bei Einführung einer neuen Technologie zunächst begrenzt ist, entscheidet sich nur ein Teil der Käufer dafür. Der tatsächliche Marktanteil wird durch die begrenzte Verfügbarkeit von Lkw-Modellen begrenzt.
4. Durch Multiplikation mit der Gesamtzahl der Neuzulassungen ergeben sich die Neuzulassungen pro Jahr und pro Antriebsart.
5. Die Neuzulassungen über die Jahre werden mit einem Bestandsmodell zu einem Fahrzeugbestand aggregiert.

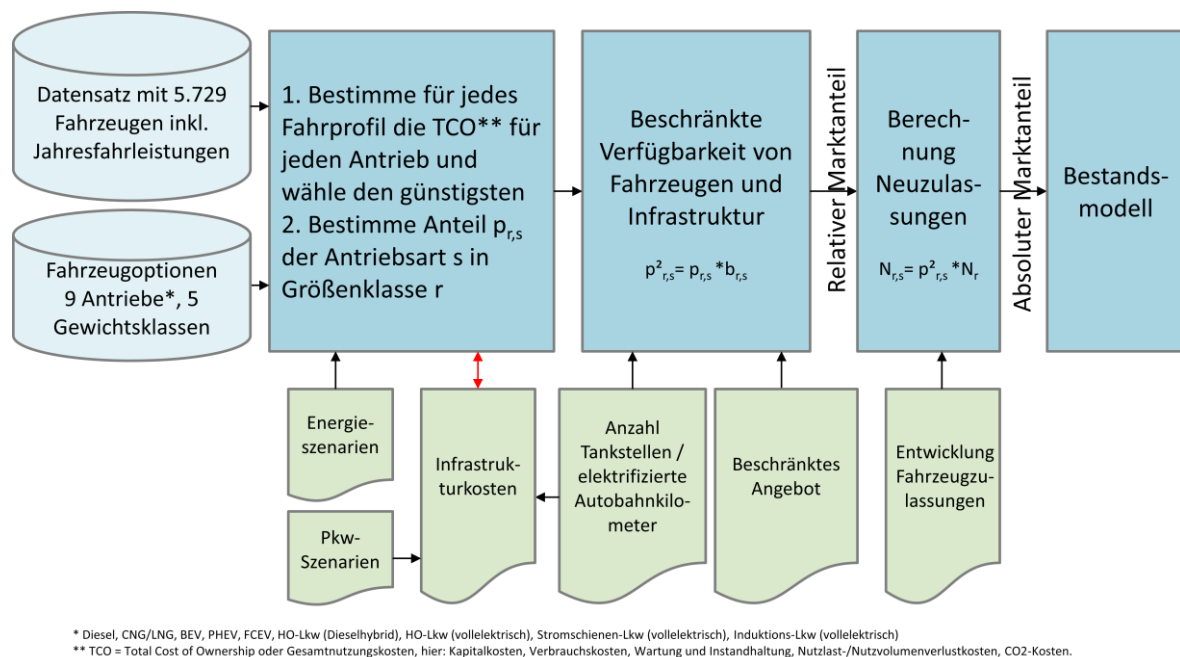


Abbildung 27: Übersicht zur Vorgehensweise im Modell

### 3.1.2 TCO-Berechnung

Auf Basis der Jahresfahrleistung für jeden Lkw kann der Einsatz als BEV, der elektrische Fahranteil als PHEV und der elektrische Fahranteil bei vorgegebenem Ausbau der Oberleitung für einen Hybrid-Oberleitungs-Lkw (HO-Lkw) bestimmt werden. Dies sind alles Eingangsgrößen für die Berechnung der Gesamtnutzungskosten (TCO), auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Die Möglichkeiten und Grenzen einer Modellierung von Fahrzeug-Kaufentscheidungen auf Basis von TCO ist ausführlich in Plötz et al. (2013) erläutert. Die Darstellung der TCO-Berechnung in diesem Abschnitt folgt Plötz et al. (2013).

Die jährlichen TCO für einen Lkw mit Fahrprofil  $f$ , d. h. einer gegebenen Jahres- und Tagesfahrleistung, im Jahr  $t$  ( $TCO_{f,t}^a$ ) setzt sich aus der Summe der Anschaffungs- und Betriebskosten zusammen:



$$TCO_{f,t}^a = a_{capex}^{f,t} + a_{opex}^{f,t}.$$

Dabei bezeichnen

$TCO_{f,t}^a$ : jährliche TCO eines Fahrprofils  $f$  im Jahr  $t$

$a_{capex}^{f,t}$ : Annuität für die Kapitalkosten eines Fahrprofils  $f$  im Jahr  $t$

$a_{opex}^{f,t}$ : Annuität für die operativen Kosten eines Fahrprofils  $f$  im Jahr  $t$

Dies sind insbesondere die Anschaffungsausgaben, die auf ein Jahr diskontiert werden, ( $a_{capex}^{f,t}$ ) und die laufenden Kosten ( $a_{opex}^{f,t}$ ). Die einzelnen Summanden werden im Folgenden einzeln dargestellt. Die Annuität<sup>4</sup> der Anschaffungsausgaben  $a_{capex}^{f,t}$  für ein Fahrprofil  $f$  im Jahr  $t$  ergibt sich gemäß

$$a_{capex}^{f,t} = \frac{(NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}}) \cdot (1+i)^{T_u} i}{(1+i)^{T_u} - 1}$$

$NLP_{r,s,t}$ : Nettolistenpreis für Fahrzeuggröße  $r$  mit Antrieb  $s$  im Jahr  $t$  (€)

$\kappa_{r,s,t}$ : Batteriegröße für Fahrgröße  $r$  mit Antrieb  $s$  im Jahr  $t$  (kWh)

$p_{Batt_{s,t}}$ : Batteriepreis für Antrieb  $s$  im Jahr  $t$  (€/kWh)

$i$ : Zinssatz

$T_u$ : Nutzungsdauer des Fahrzeugs in Nutzergruppe  $u$  (a)

Die Investitionen setzen sich dabei aus den Investitionen für das Fahrzeug ( $NLP_{r,s,t}$ ), und denen für die Batterie ( $\kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}}$ ) zusammen, welche auf ein Jahr diskontiert werden.

Die Annuität der laufenden Kosten  $a_{opex}^{f,t}$  für ein Fahrprofil  $f$  im Jahr  $t$  ergibt sich aus:

$$a_{opex}^{f,t} = JFL_f \cdot \left( s_{e_{f,t}} \cdot (c_{e_{r,s,t}} \cdot k_{e_t} + k_{e,CO_2}) + (1 - s_{e_{f,t}}) \cdot (c_{c_{r,s,t}} \cdot k_{c_t} + k_{c,CO_2}) \right) + k_{V/G}$$

$JFL_f$ : Jahresfahrleistung des Fahrprofils  $f$  (km)

$s_{e_{f,t}}$ : elektrischer Fahranteil des Fahrprofils  $f$  im Jahr  $t$

$c_{e_{r,s,t}}$ : elektrischer Verbrauch eines Fahrzeugs der Größe  $r$  und Antriebs  $s$  zum Zeitpunkt  $t$  (kWh/km)

$k_{e_t}$ : Kosten für elektrischen Strom im Jahr  $t$  (€/kWh)

$k_{e,CO_2}$ : Kosten für CO<sub>2</sub> im elektrischen Betrieb (€/km)

$c_{c_{r,s,t}}$ : konventioneller Verbrauch (Benzin oder Diesel) eines Fahrzeugs der Größe  $r$  und Antriebs  $s$  zum Zeitpunkt  $t$  (l/km)

$k_{c_t}$ : Kraftstoffkosten (Benzin oder Diesel) zum Zeitpunkt  $t$  (€/l)

$k_{e,CO_2}$ : Kosten für CO<sub>2</sub> im konventionellen Betrieb (€/km)

$k_{V/G}$ : jährliche Kosten für einen eventuellen Gewichts- oder Volumenverlust

Es gibt also einen Teil, der von der Jahresfahrleistung ( $JFL_f$ ) abhängt, und im elektrischen Modus Kosten verursacht ( $s_{e_{f,t}} \cdot (c_{e_{r,s,t}} \cdot k_{e_t} + k_{e,CO_2})$ ) und ein Kostenblock im konventionellen

<sup>4</sup> Siehe Wöhe und Döring (2002, S. 622) für eine Einführung in die Investitionsrechnung.

Modus  $((1 - s_{ef,t}) \cdot (c_{cr,s,t} \cdot k_{ct} + k_{c,CO_2}))$ . Der elektrische Fahranteil ist dabei der Anteil, der von PHEV aufgrund der begrenzten elektrischen Reichweite zurückgelegt werden kann bzw. der Anteil den ein HO-Lkw aufgrund seines individuellen Anteils auf Oberleitungsaustobahnen elektrifizieren kann.<sup>5</sup> Außerdem werden die Kosten für einen möglichen Volumen- oder Gewichtsverlust durch eine Batterie oder einen Wasserstofftank eingerechnet (vgl. Wietschel et al. 2017, Kapitel 3). Als gleich angenommen, und deshalb nicht berücksichtigt, werden die Kosten für Kfz-Steuer, die Mautkosten und die Kosten für den Fahrer. Sämtliche Werte für die einzelnen Variablen finden sich in Abschnitt 5.2.

Diese TCO-Berechnung erfolgt für jeden Lkw für die Zeitpunkte 2015 und 2030 und für jede Antriebsart. Der jeweils TCO-optimale Antrieb wird gewählt. Der Anteil aller Fahrzeuge einer Fahrzeuggruppe mit TCO-optimalem Antrieb  $s$  innerhalb seiner Größenklasse ist der mögliche Marktanteil dieser Antriebsart.

### 3.1.3 Beschränkte Modellverfügbarkeit

Neben der begrenzten Verfügbarkeit von Infrastruktur ist die begrenzte Auswahl an Marken und Modellen ein Hemmnis für die Verbreitung einer neuen Technologie. Wenn nur eine oder wenige Marken die neue Antriebsart anbieten, werden markentreue Kunden anderer Marken den Kauf eines Fahrzeugs mit neuer Antriebsart nicht Erwägung ziehen. Dies kann den möglichen Marktanteil auf Basis der TCO erheblich reduzieren. Abbildung 28 zeigt beispielhaft die Anteile verschiedener Marken an den Neuzulassungen von Sattelzugmaschinen (SZM) in Deutschland.

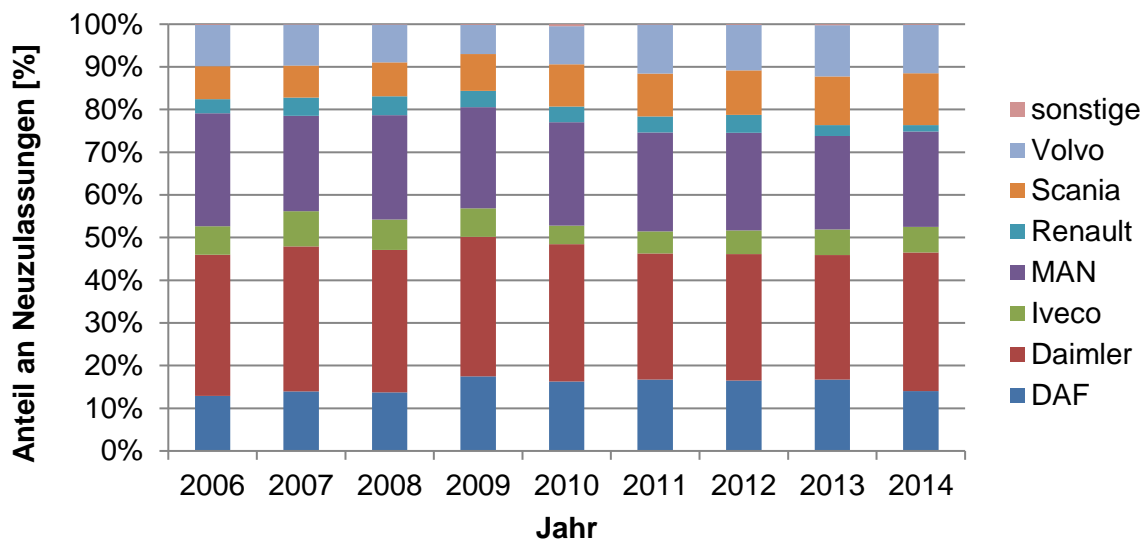


Abbildung 28: Anteil verschiedener Marken an den Neuzulassungen von SZM

<sup>5</sup> Für eine HO-Lkw-Variante mit einer Batterie und ohne Verbrennungsmotor entspricht der konventionelle Anteil dem, der nicht an der Oberleitung zurückgelegt wird.

Für die nachfolgenden Rechnungen wurde eine beschränkte Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Infrastruktur wie folgt angenommen. Für die Infrastruktur wurde die Beschränkung analog zu (Michaelis et al. 2015) verwendet: „Auf Basis bestehender Literatur wird im Modell eine Verfügbarkeit von 100 % unterstellt, sobald 15 % der existierenden Tankstellen Wasserstoff anbieten“ (Sperling und Kurani 1987). Unter der Annahme, dass für Elektrofahrzeuge nur Schnellladestationen maßgeblich sind, wurden die Tankstellenzahlen und ihr geplanter Ausbau für Gasfahrzeuge (engl. Natural Gas Vehicles, NGV), Brennstoffzellenfahrzeuge sowie von Schnellladesäulen ermittelt und mittels logistischem Wachstum fortgeschrieben. Daraus ergibt sich für 2015 eine Infrastrukturverfügbarkeit von 40 % (basierend auf 913 Tankstellen für NGV von 15 % von 14.531 Tankstellen<sup>6</sup>). Zudem werden 1 % für FCEV, PHEV, BEV aufgrund der sehr geringen Infrastrukturverbreitung angesetzt. Für HO-Lkw wird die Infrastrukturverfügbarkeit explizit abgebildet und daher nicht berechnet.

Für die Fahrzeuge konnten analog dem Vorgehen in Plötz et al. (2013) keine Ankündigungen über zukünftige Fahrzeuge gefunden werden. Es wurde deshalb die Annahme getroffen, dass eine Beschränkung des Angebots auf 10 % für Gas- und Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2017 und für FCEV und HO-Lkw bis zum Jahr 2022 gilt. Nach sieben Jahren ist das Angebot nur noch auf 50 % beschränkt. Damit werden logistische Kurven gebildet und so die Verfügbarkeit für jedes Jahr ermittelt.

Multipliziert man nun die beiden Verfügbarkeiten, so erhält man eine Beschränkung der Neuzulassungen durch Fahrzeugangebot und Infrastruktur im Jahr 2015 auf 2 % für Gasfahrzeuge, 0,1 % für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge und 1 % für HO-Lkw (nur Angebotsbeschränkung). Das heißt, im Jahr 2015 werden nur 2 % der wirtschaftlichen Gasfahrzeuge als Marktanteil berücksichtigt, für die anderen 98 % wird die zweitbeste TCO-Lösung gewählt (ggf. ebenfalls mit Beschränkungen). Das führt zu deutlichen Verschiebungen in den Marktanteilen, berücksichtigt aber die Risikoaversität der Käufer hinsichtlich einer neuen Technologie und tatsächliches Kaufverhalten sowie den begrenzten Nutzen bei mangelnder Infrastrukturverfügbarkeit (vgl. Plötz et al. 2013 und weitere Referenzen dort). Für das Jahr 2030 ergeben sich Beschränkungen auf 87 % (NGV, BEV und PHEV) und 58 % für FCEV und HO-Lkw.

### 3.1.4 Berechnung der Kosten für THG-Emissionen

Die THG-Emissionen werden im Modell als CO<sub>2</sub>-Äquivalente berechnet. Dabei ist zwischen den Emissionen der Kraftstoffherzeugung (Well-to-Tank, WtT) und bei der Nutzung zu unterscheiden (Tank-to-Wheel, TtW). Für die Well-to-Tank-Emissionen werden für alle strombasierten Kraftstoffe die Emissionen der Stromerzeugung und die jeweiligen Verluste beim Transport und der Umwandlung angenommen. Hier wird für BEV und PHEV ein Leitungsverlust von 5 % am Niederspannungsnetz und für alle HO-Lkw-Varianten beim

---

<sup>6</sup> vgl. NGV Journal 2015, Statisches Bundesamt 2015, NPE 2014

Strombezug von der Infrastruktur am Mittelspannungsnetz ein Leitungsverlust von 2 % angesetzt. Für die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse werden ein Leitungsverlust von 5 % beim Strombezug am Niederspannungsnetz, ein Wirkungsgrad von 75 % des Elektrolyseurs und ein Wirkungsgrad von 88 % bei der Komprimierung des Wasserstoffs auf 700 bar angenommen. Für die Gas- und Dieselerzeugung werden pauschal Aufschläge von 20 % der WtW-Emissionen angenommen. Alle Annahmen für Wirkungsgrade stammen aus (Wietschel et al. 2016a). Diese Kraftstoffarten sind lokal emissionsfrei, sodass keine TtW-Emissionen entstehen. Für Diesel- und gasbetriebene Lkw werden die Werte aus DLSV (2013) angenommen. Die WtW-Emissionen für das Jahr 2030 bei Durchschnittsemissionen für die Stromerzeugung (vgl. Abschnitt 3.2.1) sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: CO<sub>2</sub>-Emissionen (WtW) für betrachtete Antriebsarten 2030<sup>7</sup>

Emissionen WtW	Diesel	NGV	BEV	PHEV Strom- betrieb	FCEV	HO-Lkw Strom- betrieb
(kg CO <sub>2</sub> /kWh)	0,324	0,242	0,202	0,202	0,306	0,196

### 3.1.5 Besonderheiten HO-Lkw sowie BEV und PHEV-Fahrzeuge

Für HO-Lkw sind der angenommene Ausbau der Oberleitung und für BEV bzw. PHEV deren beschränkte Reichweite gesondert zu berücksichtigen. Für das Jahr 2016 wird angenommen, dass keine Oberleitung zur Verfügung steht und reine Batteriefahrzeuge (BEV) und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) unterwegs nicht nachladen können. Für spätere Jahre hängt der Anteil des Fahrens an der Oberleitung möglicher HO-Lkw davon ab,

- ob das Fahrzeug häufig auf der Autobahn gefahren wird (= individueller Autobahnanteil),
- welche Menge an Autobahnen und welche Autobahn elektrifiziert ist (= HO-Ausbau),
- und mit welcher Wahrscheinlichkeit dieses Fahrzeug auf der elektrifizierten Autobahn unterwegs ist (= DE-Anteil).

Die Details für die Berechnung von HO-Lkw sind im Abschlussbericht zur Machbarkeitsstudie von HO-Lkw dargestellt (Wietschel et al. 2017).

## 3.2 Ergebnisse

Im Rahmen der Studie wird eine Vielzahl an Themen untersucht, um HO-Lkw ganzheitlich zu bewerten. Die Untersuchung schließt dabei technische und ökonomische Aspekte (betriebs- und volkswirtschaftliche) der Fahrzeuge und Infrastruktur mit ein. Analysiert wer-

<sup>7</sup> PHEV und HO-Lkw im Dieselbetrieb mit gleichen Emissionen wie Diesel-Lkw.

den aber ebenso die energie- und klimapolitischen Auswirkungen und ökologischen Gesichtspunkte des HO-Lkw-Konzepts.

Hierfür werden einheitliche Szenarien für Energieträger und Infrastrukturausbau definiert, die in Abschnitt 3.2.1 detailliert beschrieben werden. Zuvor wurde bereits der mögliche Ausbau einer HO-Infrastruktur in Deutschland anhand der hochausgelasteten Autobahnen analysiert (Wietschel et al. 2017, Kapitel 2). Die Verbreitung der HO-Lkw wird über das in Abschnitt 3.1 beschriebene Modell ermittelt und in den Abschnitten 3.2.2 bis 3.2.5 dargestellt. Hierbei ist neben der Fahrzeugzahl auch die Endenergieeinsparung und die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von besonderer Relevanz.

### 3.2.1 Annahmen und Szenarien

Für Energieträgerpreise, die in zahlreichen Studien im Rahmen der MKS verwendet werden, werden die in Tabelle 8 zusammengefassten einheitlichen Annahmen verwendet. Alle Preise sind ohne Mehrwertsteuer angegeben.

Tabelle 8: Preisannahmen für Energieträger und Batterien, Batterielebensdauer und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung

Parameter (alle Preise ohne MWSt.)	Einheit	2015	2030	Quelle
Preis Brennstoffzellensystem	€/kW <sub>el</sub>	400	80	(1)
Batteriepreis	€/kWh	509	186	(2)
Batterielebensdauer	Vollzyklen	3.000	5.000	(3)
Dieselpreis	€/l	0,98	1,53	(4)
	€/kWh	0,10	0,15	
Gaspreis	€/kg	0,87	1,48	(5)
	€/kWh	0,06	0,11	
Wasserstoffpreis	€/kg	8,60	6,65	(6)
	€/kWh	0,26	0,20	
Strompreis gewerblich	€/kWh	0,21	0,22	(7)
Strompreis Industrie	€/kWh	0,14	0,16	(7)
Durchschnittsemissionen dt. Kraftwerkspark	t CO <sub>2</sub> /MWh		0,192	(8)
Grenzemissionen dt. Kraftwerkspark	t CO <sub>2</sub> /MWh		0,448	
Dieselpreis ohne Energiesteuer	€/l		0,90	(9)
Gaspreis ohne Energiesteuer	€/kg		4,66	
Wasserstoffpreis ohne Energiesteuer	€/kg		1,04	
Strompreis gewerblich ohne Energiesteuer	€/kWh		0,07	
Strompreis Industrie ohne Energiesteuer	€/kWh		0,08	
Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur	km	0	4.000	(10)

(1) (Hülsmann et al. 2014, Propfe et al. 2012, Schneider 2014 ); (2) (Thielmann et al. 2015); (3) (Wietschel et al. 2016a); (4) (Schade und Wietschel 2016); (MWV 2016) (5) (Schade und Wietschel 2016); (Njumaen 2016); (6) (McKinsey et al. 2011); (7) (Auf der Maur et al. 2015); (8) Berechnung auf Basis des Szenarios KS95 in (Repenning et al. 2015); (9) Berechnung auf Basis von (Schade und Wietschel 2016) und (EnStG 2016), (10) eigene Annahme basierend auf (Auf der Maur et al. 2015)

Der Batteriepreis auf Systemebene wird auf Basis von (Thielmann et al. 2015) berechnet, wobei laut einer Vielzahl von Studien eine Reduktion auf knapp ein Drittel des heutigen Wertes möglich ist (Nykvist und Nilsson 2015). Im Rahmen dieser Studie wird, um die Skaleneffekte zu nutzen, davon ausgegangen, dass es zukünftig keine spezielle Batterieentwicklung von Lkw-Lithium-Ionen-Batterien geben wird, sondern diese die gleichen Batteriezellen und -module wie Pkw verwenden. Eine Skalierbarkeit der Batteriezellen ist laut Expertenaussagen gegeben und wird angestrebt (Wietschel et al. 2016b).

Die Batteriebensdauer gibt an, nach wie vielen Vollzyklen sie aus ökonomischen Gründen ersetzt werden muss<sup>8</sup> und ist daher maßgeblich für die Wartungs- und Instandhaltungskosten aller Fahrzeuge, die eine Batterie an Bord haben (vgl. Wietschel et al. 2017, Kapitel 3). Diese wurden mit zahlreichen FuE-Experten aus Wissenschaft und Industrie abgestimmt, da es wenige Literaturquellen für die Batteriebensdauern gibt (Wietschel et al. 2016a). Es werden 3.000 Vollzyklen für 2015 und 5.000 Vollzyklen für 2030 angenommen.

Zudem werden die Annahmen für die Kosten des Brennstoffzellensystems und des Druckgastanks sowie deren Lebensdauern für die Berechnung benötigt. Diese entstammen (Hülsmann et al. 2014, Propfe et al. 2012, Schneider 2014). Für das Brennstoffzellensystem werden 2015 Kosten von 400 Euro/kW<sub>el</sub> und für das Jahr 2030 betragen diese 80 Euro/kW<sub>el</sub>. Die Kosten des Druckgastanks werden mit 36,5 Euro/kWh im Jahr 2015 beziffert und mit 14 Euro/kWh für 2030. Als Lebensdauer für den BZ-Stack wird 240.000 km im Jahr 2015 und 400.000 km im Jahr 2030. Für den Druckgastank liegen diese Werte bei 483.000 km für 2015 und 2030.

Sämtliche Energieträgerpreise (alle ohne MwSt.) für 2015 werden Portalen ihrer wichtigsten Verbände entnommen. Für 2030 wurde der Diesel- und der Gaspreis aus dem Bundesverkehrswegeplan der Bundesregierung entnommen, der für alle MKS-Studien als Vorlage dient. Im Rahmen dieser Studie wird die Energiesteuerreduktion für Erdgas bis zum Jahr 2030 aufgehoben, sodass ein Preis von 1,48 €/kg (ohne MwSt.) zu zahlen ist (EnStG 2016). Der Wasserstoffpreis für 2030 basiert auf den Annahmen des Industriekonsortiums (siehe McKinsey et al. 2011), allerdings ist auch hier die Energiesteuerbefreiung ausgesetzt.<sup>9</sup> Für die Strompreise wird die Studie von Auf der Maur et al. (2015) verwendet, in der von einer moderaten Steigerung der Strompreise bis 2020 und einer

---

<sup>8</sup> Bei alterungsbedingter Reduktion der Kapazität wird die Batterie in die Zweitnutzung übergeben und nicht mehr in Fahrzeugen eingesetzt.

<sup>9</sup> Hierbei ist zu erwähnen, dass dieser Preis auch die Kosten für die Tankstelleninfrastruktur enthält.

anschließenden Stagnation bis 2030 ausgegangen wird. Daraus resultieren Strompreise für gewerblich gehaltene Fahrzeuge von 0,22 €/kWh und ein Industriestrompreis von 0,16 €/kWh. Der Preis für gewerblichen Strom wird für die Bewertung der BEV und PHEV verwendet, da diese zumeist auf ihren Betriebshöfen verwendet werden, während für die Bewertung der HO-Lkw der Industriestrompreis angesetzt wird, da angenommen wird, dass der Strombezug an der Oberleitung den Vergünstigungen der Großabnehmer entsprechen wird.

Bei der Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (und des Primärenergieaufwands im Kraftwerkspark) tritt stromseitig ein Zuordnungsproblem zur nachgefragten Kilowattstunde Strom auf. Wenn ein Barrel Erdöl eingekauft wird, kann die Emissionswirkung von Experten anhand seiner chemischen Eigenschaften eindeutig bestimmt werden. Wenn eine Kilowattstunde Elektrizität eingekauft wird, gibt es keine physikalische oder chemische Analyse, die auf die Quelle schließen lassen. Das Stromnetz ist vergleichbar mit einem See, auf dem auf der einen Seite eine Reihe an Stromproduzenten Strom einleiten und auf der anderen Seite Strom entnommen wird.

Zur Lösung dieses Problems gibt es Ansätze über Marktmechanismen oder statistische Definitionen. Dazu wird zunächst aufgeschlüsselt, welche Kraftwerkstypen in der jeweiligen Stunde zu welchen Kosten Strom produzieren. Anhand des eingesetzten Primärenergieträgers (bei konventionellen Kraftwerken v. a. Gas oder Kohle) können die CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergieverbräuche für die Kraftwerke berechnet werden. Anhand dieser Werte können mit zwei üblichen Ansätzen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. Primärenergieverbräuche berechnet werden: Es werden entweder Durchschnittswerte über den gesamten Strommix der jeweiligen Stunde übernommen (statistische Definition), oder mit Grenzwerten gerechnet, die von dem Grenzkraftwerk abgeleitet werden, das unter den aktivierten Kraftwerken die höchsten variablen Kosten aufweist (Marktmechanismus).

Beide Werte werden hier in der Studie angegeben, da sie zwei verschiedene Sichtweisen darstellen: Entweder wird das Stromangebot gleichmäßig auf die Nachfrager in der Stunde verteilt, oder aber es wird eine Reihenfolge unterstellt, die neuen Nachfragern wie hier den Sektorkopplungsoptionen den Einsatz zusätzlicher Kraftwerke zuschreibt, wenn nicht ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien vorhanden ist. Als zusätzliche, weitere Perspektive ließe sich auch argumentieren, dass in der EU durch die Einführung der Obergrenzen für CO<sub>2</sub>-Zertifikate die Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen reguliert ist und eine direkte Zurechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die neuen Verbraucher somit nicht notwendig ist.

Für die Berechnung der Durchschnitts- und Grenzemissionen des Stroms wird das Klimaschutzszenario mit einer Reduktion der THG-Emissionen um 95 % bis 2050 aus (Repenning et al. 2015) als Grundlage verwendet. Basierend auf diesem Szenario kann der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Stromerzeugung simuliert werden, was aufgrund der zu geringen Infor-

mationen über Kraftwerksausbau und EE-Einspeisung laut Auf der Maur (2015) nicht möglich ist.

Diese Simulation erfolgt mithilfe eines Fundamentalmodells. Im Fundamentalmodell wird der Day-Ahead-Markt abgebildet, an dem Stromangebot und -nachfrage zusammentreffen. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Annahmen zum Kraftwerkspark, der erneuerbaren Stromerzeugung und der Stromnachfrage werden die stündliche Residuallast und Spotmarktpreise für die zukünftigen Jahre ermittelt. Als Eingangsdaten dienen Energieträger- und CO<sub>2</sub>-Preise, techno-ökonomische Parameter der Kraftwerke und Pumpspeicher sowie die stündlichen Verläufe der Stromerzeugung erneuerbarer Energieträger und der Stromnachfrage für die zu simulierenden Jahre. Im Modell wird anhand der variablen Kosten der Erzeuger unter Berücksichtigung von Anfahrkosten und Mindeststillstandszeiten die Merit Order ermittelt. Als Ergebnis werden die Kraftwerkseinsätze und die damit verbundenen stündlichen Spotmarktpreise und CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgegeben.

Hier ergeben sich durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung von 0,192 t CO<sub>2</sub>/MWh für 2030 und 0,448 t CO<sub>2</sub>/MWh, sofern Grenzemissionen zur Bewertung herangezogen werden, d. h. die Emissionen, die bei der Zuschaltung eines zusätzlichen Verbrauchers entstehen. Diese sind als Extremfall für alle neuen Verbraucher ansetzbar, wie auch die Nullemissionen, die „grünen“ Verbrauchern keine Emissionen zuweisen. Im Rahmen dieser Studie werden alle drei Optionen dargestellt, wobei im Basisszenario von den Durchschnittsemissionen ausgegangen wird.

Weiterhin sind in Tabelle 8 die Energieträgerpreise ohne ihre Energiesteuer aufgelistet, die in einer Variationsrechnung verwendet werden. Diese wurden basierend auf der aktuellen Gesetzgebung berechnet (EnStG 2016). Zu guter Letzt bestimmt die Nutzung einer Oberleitungsinfrastruktur ihre Wirtschaftlichkeit, jedoch ist auch die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge vom Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur abhängig, da die Fahrzeuge wesentlich energieeffizienter und günstiger an der Oberleitung fahren. Als Startpunkt für die Analysen wird deshalb im Basisszenario von einem 4.000-km-Ausbau im Jahr 2030 ausgegangen, dieser Wert wird aber in Variationsrechnungen weiter untersucht. Basierend auf den Untersuchungen zur Oberleitungsinfrastruktur in Wietschel et al. (2016c, Kapitel 2) wird für die Variante des HO-Lkw in der Batterie-Variante von einem reduzierten Infrastrukturausbau von etwa 30 % der zu elektrifizierenden Strecken ausgegangen. Die Dieselhybridvariante wird mit einem durchgängigen Infrastrukturausbau untersucht.<sup>10</sup>

### 3.2.2 Markthochlauf bis 2030 (Basisszenario)

Für die Untersuchung wird mit Hilfe des zuvor beschriebenen Modells (Abschnitt 3.1), der verschiedenen Fahrzeugparameter (Abschnitt 5.2) und den eingangs dieses Kapitels be-

---

<sup>10</sup> D. h. bei 4.000 km Autobahnausbau werden bei der Batteriehybridvariante nur 1.200 km (30 %) ausgebaut, während für den Dieselhybrid die gesamte Strecke ausgebaut wird.



schriebenen Energieträgerpreisen (Abschnitt 3.2.1), der Markthochlauf für sämtliche alternativen Antriebsarten ermittelt. Dabei wird im Wesentlichen (1) der Bestand der Fahrzeuge im Jahr 2030, (2) die damit erzielte Endenergieverbrauchseinsparung (EEV) und (3) die resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion analysiert. Nachfolgend ist die Entwicklung der Fahrzeugneuzulassungen (als Anteil der Neuzulassungen auf der linken Seite) und Fahrzeugbestände (rechts) für alle fünf Fahrzeuggrößenklassen von 2015 bis 2030 grafisch dargestellt (Abbildung 29 bis Abbildung 33). Die Entwicklung aller drei Ergebnisgrößen nach Antriebsarten und Größenklassen untergliedert findet sich in Tabelle 9. Insgesamt kann im Basisszenario durch die Diffusion der alternativen Antriebe in allen Größenklassen ein Fahrzeugbestand von knapp einer Million Lkw mit alternativen Antrieben im Jahr erreicht werden, was einem Anteil von 34 % des Fahrzeugbestands entspricht. Unter den getroffenen Annahmen kann so eine EEV-Einsparung von 7,0 TWh und eine CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von 11,2 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2030 (-26 %) erzielt werden. Dieses Szenario wird nicht als das wahrscheinlichste Szenario angesehen, dient aber der Orientierung zur Einordnung der später folgenden Sensitivitäts- und Variationsrechnungen.

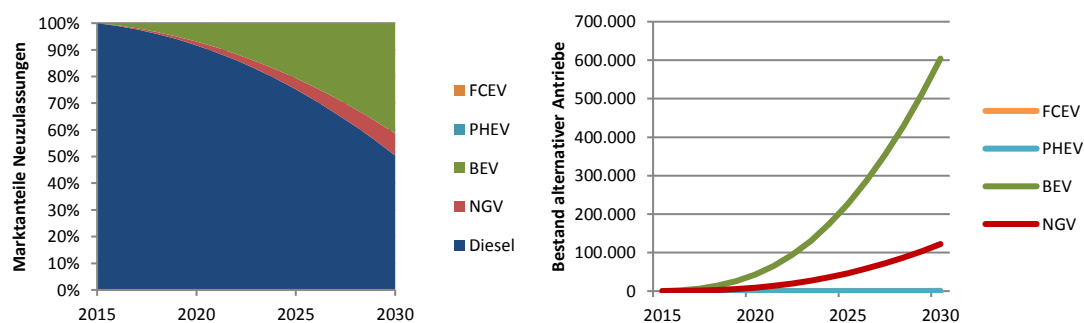


Abbildung 29: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 1 (bis 3,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

In der kleinsten Größenklasse 1 (bis 3,5 t) werden noch bis 2030 Dieselfahrzeuge die Neuzulassungen dominieren. Die wichtigsten alternativen Antriebe in dieser Größenklasse besitzen die Batteriefahrzeuge, die hier vor allem aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz, die sich auf die Verbrauchskosten auswirkt, in den Bestand kommen. Gleichzeitig fahren die ersetzten Fahrzeuge nur so viel, dass sie ihre Reichweitenbeschränkung nicht überschreiten. Für Vielfahrer können sich auch Gasfahrzeuge rechnen. Hier ist der Verbrauchkostenvorteil gegenüber Diesel aber nicht so groß, sodass große Jahresfahrleistungen notwendig sind, um die höheren Antriebsstrangkosten zu amortisieren. Alle anderen Antriebsarten haben keinen oder keinen nennenswerten Marktanteil an den Neuzulassungen.

Da in der Größenklasse 1 viele Fahrzeuge zugelassen werden, ist der Bestand an BEV und Gasfahrzeugen (engl. Natural Gas Vehicles, NGV) mit 600.000 bzw. 120.000 Fahrzeugen im Vergleich zu den anderen Größenklassen hoch (vgl. Tabelle 9). Auch ist der

Anteil an den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben dieser Größenklasse vergleichsweise hoch (ca. 70 % der Fahrzeuge) wie auch ihr Beitrag zur EEV-Einsparung. Zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen tragen die Fahrzeuge mit alternativen Antrieben dieser Größenklasse mit 2,6 Mio. t CO<sub>2</sub> jedoch einen geringeren Beitrag bei (20 % der Gesamteinsparung), da der Beitrag der kleineren Größenklassen geringer ist (vgl. Tabelle 1).

In Größenklasse 2 (3,5 bis 7,5 t) werden Dieselfahrzeuge unter den getroffenen Annahmen aus den Neuzulassungen bis 2030 fast vollständig verdrängt; sie kommen nur noch in den sehr kleinen Reichweitenbereichen zum Einsatz, wo alternative Antriebe ihre Verbrauchsvorteile nicht ausspielen können. Bei geringen bis mittleren Reichweiten dominieren vor allem die BEV mit einem Marktanteil von fast 60 %. Die Fahrzeuge, die im Langstreckeneinsatz sind, werden durch Brennstoffzellen- (20 %) oder Gasfahrzeuge (5 %) ersetzt.

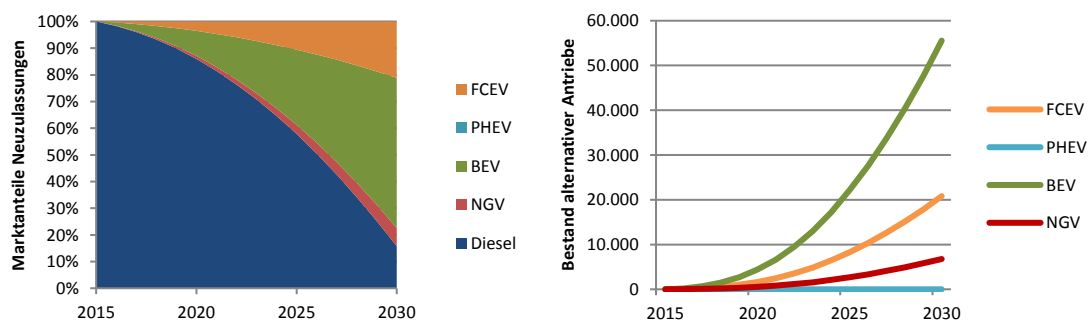


Abbildung 30: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 2 (3,5 t bis 7,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass der Fahrzeugbestand in der Größenklasse 2 deutlich geringer als in der Größenklasse 1 ist (siehe y-Achse). Mit etwa 80.000 Fahrzeugen im alternativen Fahrzeugbestand 2030 trägt GK2 nur etwa 8 % zur Gesamtfahrzeugzahl bei. Der Beitrag der EEV-Einsparung ist mit 1,0 TWh etwas höher (13 %) als in GK1, während die CO<sub>2</sub>-Einsparung mit 0,6 Mio. t CO<sub>2</sub> nur etwa 5 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Reduktion durch den Einsatz alternativer Antriebe in Lkw ausmacht. Dies liegt im Vergleich zu GK1 vor allem an den im Vergleich zu BEV weniger effizienten FCEV, bei denen größere Umwandlungsverluste die CO<sub>2</sub>-Bilanz schmälern.

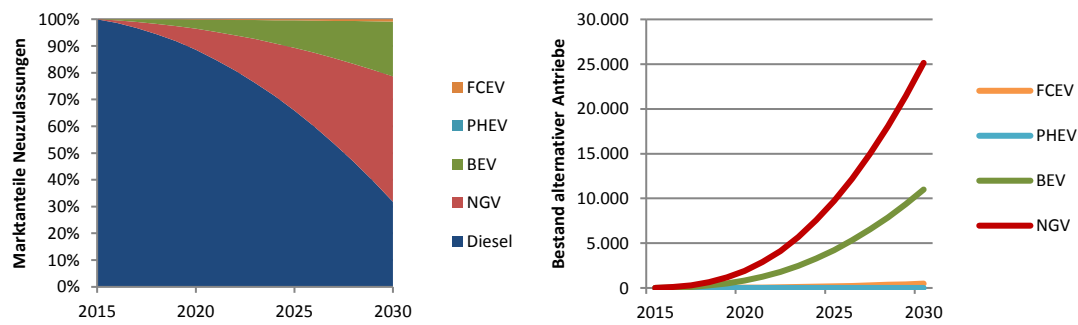


Abbildung 31: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 3 (7,5 t bis 12 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

Die Marktanteile in den Neuzulassungen von GK3 (7,5 bis 12 t) sind im Jahr 2030 im Wesentlichen von drei Antriebsarten geprägt: Dieselfahrzeuge (30 %, Tendenz sinkend), BEV (20 %, Tendenz steigend) und Gasfahrzeuge (50 %, Tendenz steigend). Brennstoffzellenfahrzeuge liegen bezüglich ihrer TCO nahe an den Gasfahrzeugen. Die Verbrauchsvorteile sind aber gering, sodass sich Brennstoffzellenfahrzeuge vor allem in den großen Reichweitenbereichen und Gasfahrzeuge in den mittleren Reichweitenklassen durchsetzen, bei denen BEV an ihre Reichweitenlimits stoßen.

Im Bestand drückt sich dies in rund 10.000 BEV und 25.000 NGV im Jahr 2030 aus. Hierdurch werden in der GK3 zwar 38 % der Fahrzeuge durch alternative Antriebe ersetzt, jedoch trägt die GK3 dadurch nur mit 3,5 % zum alternativen Antriebsbestand über alle Größenklassen bei. Auch der Beitrag zur EEV-Einsparung ist mit 0,3 TWh 2030 gering (5 % der gesamten EEV-Einsparung), während die Emissionsreduktion mit 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub> einen größeren Beitrag leistet (10 %). Dies liegt unter anderem an den ähnlich angenommenen Verbräuchen von Gasfahrzeugen im Vergleich zu Dieselfahrzeugen, die eine CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung, jedoch eine geringere EEV-Einsparung mit sich bringt.

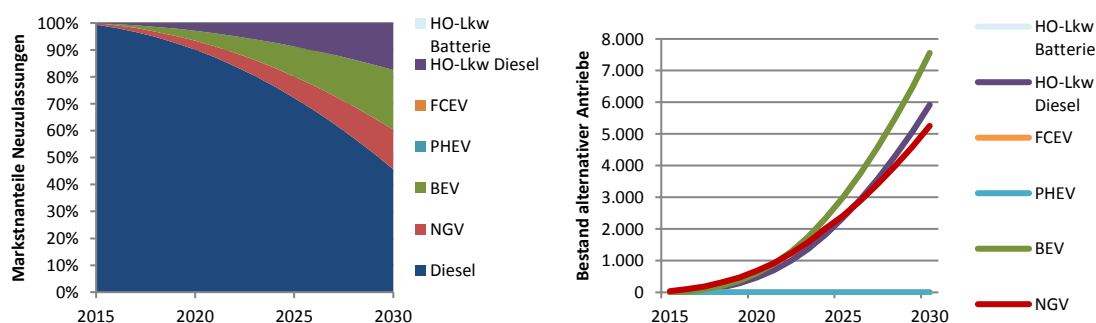


Abbildung 32: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 4 (12 t bis 26 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

In Größenklasse 4 dominieren weiterhin Dieselfahrzeuge die Neuzulassungen (ca. 50 %), während sich die restlichen Marktanteile zu etwa gleichen Teilen auf NGV, BEV und HO-

Diesel-Lkw aufteilen. Dabei sind HO-Lkw immer günstiger als Dieselfahrzeuge, wenn sie mit dem elektrischen Fahranteil die Mehrkosten im Vergleich zum Diesel amortisieren können. Bei geringeren Jahresfahrleistungen sind BEV die günstigere Alternative, sie stoßen aber häufig an ihre Reichweitengrenzen. Gasfahrzeuge sind ebenfalls in den großen Reichweitenbereichen zu finden, vornehmlich, wenn die Autobahnanteile der HO-Lkw-Diesel nicht groß genug sind (z. B. bei vereinzelt hohen Tagesfahrleistungen, aber geringen Jahresfahrleistungen, vgl. Wietschel et al. (2016c, Kapitel 5.2.4), weil dann der Anteil der Fahrten an Autobahnen zu gering ist.

In dieser Größenklasse sind die geringsten Ersetzungen des Bestands zu sehen (etwa 30 %) und die 18.000 Fahrzeuge mit alternativen Antrieben tragen nur knapp 2 % zum alternativen Fahrzeugbestand und 3 % zur EEV-Einsparung bei. Die prozentual höhere CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub> (5 % der gesamten Emissionsreduktion) ist wiederum mit der geringeren Energieeffizienz der Gasfahrzeuge zu erklären, die die Emissionsreduktion (v.a. durch die BEV) reduziert.

In der Größenklasse der Sattelzugmaschinen dominieren neben den rund 53 % Dieselfahrzeugen 2030 vor allem Gasfahrzeuge (22 %) und HO-Diesel-Lkw (25 %) die Neuzulassungen. Die meisten HO-Varianten mit Batterie können nur geringe Reichweiten zur HO-Infrastruktur mit ihrer Batterie zurücklegen und amortisieren sich daher nicht. Gleiches gilt für BEV und PHEV, während FCEV ihren Verbrauchsvorteil im Vergleich zum Diesel-Lkw gegenüber einem HO-Diesel-Lkw mit hohem elektrischen Fahranteil und einem Gasfahrzeug mit ähnlichem Verbrauch kaum ausspielen können. Wenn allerdings aus Klimaschutzgesichtspunkten Gasfahrzeuge wegfallen und die Einführung von HO-Lkw aus Gründen, die in (Wietschel et al. 2017) thematisiert werden, scheitern sollten, sind sie eine valide Option.

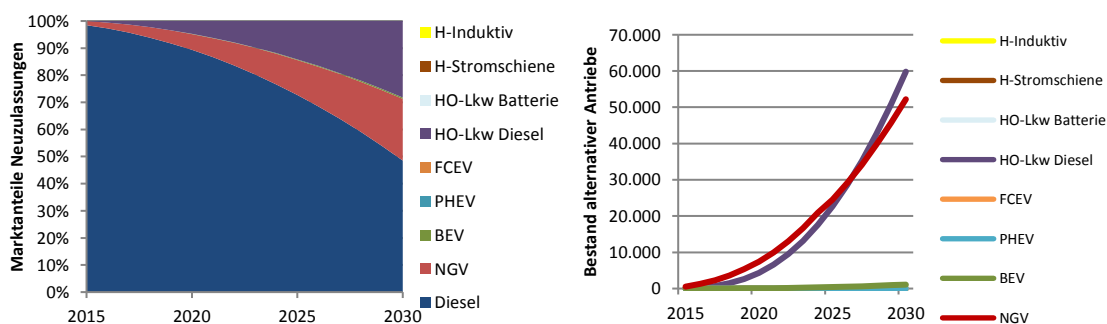


Abbildung 33: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Sattelzugmaschinen (mehr als 40 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse)

Der SZM-Bestand der alternativen Antriebe im Jahr 2030 ist von der Durchdringung der Antriebe HO-Diesel und NGV geprägt, die zusammen 47 % des Bestands der ersetzbaren

Sattelzugmaschinen umfassen (113.000 Fahrzeuge).<sup>11</sup> Damit tragen sie außerdem zu knapp 12 % des alternativen Fahrzeugbestands bei sowie zu einer EEV-Einsparung von 1,4 TWh (20 %) und einer CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung von 6,7 Mio. t CO<sub>2</sub> (60 %). Insbesondere die starke Emissionsminderung rührt von den hohen Jahresfahrleistungen und den hohen Fahrzeuggewichten her und zeigt, dass diesem Bereich auch zukünftig große Aufmerksamkeit beigemessen werden sollte.

Betrachtet man das Basisszenario hinsichtlich der Antriebsarten, so lässt sich Folgendes feststellen: *BEV* haben Verbrauchsvorteile in allen Größenklassen, sind aber vor allem in den kleineren Größenklassen zu finden, wo Reichweitenbeschränkungen für viele Fahrzeuge keine Rolle spielt. Der gesamte alternative Fahrzeugbestand 2030 wird auch von *BEV* dominiert (rund zwei Drittel), sie tragen 70 % zur EEV-Einsparung, jedoch nur 25 % zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung bei. *Gasfahrzeuge* (Natural Gas Vehicles, *NGV*) sind mit rund 200.000 Fahrzeugen im Bestand 2030 die zweitgrößte Gruppe der alternativen Antriebe. Während sie zu 60 % zum ermittelten Emissionsreduktionpotential beitragen, ist ihre EEV-Einsparung aufgrund der geringeren Energieeffizienz negativ (die gesamte EEV-Einsparung wäre etwa 30 % höher ohne die Gasfahrzeuge).

Die drittgrößte Gruppe bilden *HO-Diesel-Lkw* mit 65.000 Fahrzeugen oder 6 % des alternativen Fahrzeugbestands 2030. Ihre gesamte EEV-Einsparung beträgt 4,2 TWh (60 % der EEV-Einsparung aller alternativen Antriebe), ihr Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung ca. 20 %.

*Brennstoffzellenfahrzeuge* sind die letzte nennenswerte Gruppe im alternativen Fahrzeugbestand 2030. Sie umfassen jedoch nur 20.000 Fahrzeuge (2 % der alternativen Antriebe) und tragen mit 0,2 TWh (5 %) zur gesamten EEV-Einsparung und mit 0,2 Mio. t CO<sub>2</sub> nur zu 3 % zur gesamten Emissionsminderung bei. Die *HO-Batteriekonzepte* und *PHEV* kommen aufgrund der geringen Oberleitungs- bzw. elektrischen Fahranteile nicht zum Zug. Da diese Aufteilung zahlreichen Annahmen unterliegt, werden im Folgenden Sensitivitäts- und Variationsrechnungen durchgeführt.

In Anbetracht der Unsicherheiten einer Markthochlaufmodellierung zeigt sich zusammenfassend, dass *BEV* aus Nutzersicht besonders interessant für leichtere Nutzfahrzeuge sind und *HO-Lkw* für schwere Nutzfahrzeuge. Darüber hinaus spielen *FCEV* unter den hier getroffenen techno-ökonomischen Annahmen keine nennenswerte Rolle, und *Gasfahrzeuge* können je nach Besteuerung und Preisen nennenswerte Marktanteile erreichen.

---

<sup>11</sup> Hierbei sei nochmals erwähnt, dass alle Baufahrzeuge in GK4 und bei den SZM aufgrund der Spezialanfertigungen heraus gerechnet wurden. Dies sind 38 % in GK4 und 15 % bei den SZM.

### 3.2.3 Sensitivitäten und Variationsrechnungen

Die Ergebnisse der Markthochlaufrechnungen unterliegen unterschiedlichen Einflüssen. Diese Einflüsse werden in Sensitivitäts- und Variationsrechnungen untersucht. Bei den Sensitivitätsrechnungen wird je ein Parameter zwischen -25 % und +25 % seines Wertes im Basisszenario variiert, um den Einfluss auf ein bestimmtes Ergebnis zu untersuchen.<sup>12</sup> In den Variationsrechnungen wird die Logik der Berechnung verändert (z. B. die CO<sub>2</sub>-Emissionsbewertung von elektrischen Antrieben mit Nullemissionen anstatt von Durchschnittsemissionen) und der Einfluss auf das Ergebnis untersucht. Im Folgenden wird der Einfluss von Parametersensitivitäten und Berechnungsvariationen auf den Fahrzeugbestand im Jahr 2030 dargestellt und bzgl. der EEV-Einsparung und CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion diskutiert. Zunächst werden Sensitivitäten gezeigt, die die Bestandsentwicklung aller Antriebsarten beeinflussen. Anschließend werden diejenigen mit Einfluss auf ausschließlich eine Antriebsart gezeigt, und abschließend werden die Ergebnisse der Variationsrechnungen dargestellt.

---

<sup>12</sup> Diese Variationen sind unterschiedlich plausibel hinsichtlich ihres Auftretens in der Realität, eine einheitliche Variation dient jedoch der Vergleichbarkeit.

Tabelle 9: Lkw-Bestand (auf Tausender gerundet), EEV-Einsparung, CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Basisszenario im Jahr 2030, unterschieden nach Größenklassen und Antriebsarten

Kategorie	GK1	GK2	GK3	GK4	SZM	Gesamt
Gesamtbestand 2030	2.224.000	216.000	100.000	62.000	239.700	2.841.700
Bestand 2030 BEV	604.000	56.000	11.000	8.000	1.000	<b>680.000</b>
Anteil BEV am Bestand 2030	27 %	26 %	11 %	12 %	0 %	24 %
mittlere JFL (km)	22.425	26.466	29.149	29.633	42.930	
Energieverbrauch gesamt (TWh)	4,2	0,8	0,2	0,2	0,1	5,5
EEV-Einsparung 2030 BEV (TWh)	4,1	0,8	0,2	0,2	0,1	<b>5,4</b>
CO <sub>2</sub> -Emissionsreduktion 2030 BEV (Mio. t CO <sub>2</sub> )	1,8	0,4	0,1	0,1	0,0	<b>2,4</b>
Bestand 2030 FCEV	1000	21.000	500	0	0	<b>22.500</b>
Anteil FCEV am Bestand 2030	0 %	10 %	0 %	0 %	0 %	1 %
mittlere JFL (km)	129.513	52.626	103.671	0	0	
Energieverbrauch gesamt (TWh)	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,1
EEV-Einsparung 2030 FCEV (TWh)	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	<b>0,2</b>
CO <sub>2</sub> -Emissionsreduktion 2030 FCEV (Mio. t CO <sub>2</sub> )	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	<b>0,2</b>
Bestand 2030 HO-Lkw <sup>13</sup>	---	---	---	6.000	60.000	<b>66.000</b>
Anteil HO-Lkw am Bestand 2030	---	---	---	10 %	25 %	2 %
mittlere elektrische JFL (km)	---	---	---	44.089	77.611	
Energieverbrauch gesamt (TWh)	---	---	---	0,3	7,4	7,7
EEV-Einsparung 2030 HO-Lkw (TWh)	---	---	---	0,2	4,0	<b>4,2</b>
CO <sub>2</sub> -Emissionsreduktion 2030 HO-Lkw (Mio. t CO <sub>2</sub> )	---	---	---	0,1	2,2	<b>2,3</b>
Bestand Gasfahrzeuge 2030	122.000	7.000	25.000	5.000	52.000	<b>211.000</b>
Anteil Gasfahrzeuge am Bestand 2030	5 %	3 %	25 %	8 %	22 %	7 %
mittlere JFL (km)	46.035	63.916	72.572	135.279	157.765	
EEV-Einsparung Gasfahrzeuge 2030 (TWh)	0,1	0,0	0,0	-0,2	-2,7	<b>-2,7</b>
CO <sub>2</sub> -Emissionsreduktion NGV 2030 (Mio. t CO <sub>2</sub> )	0,8	0,1	0,6	0,3	4,5	<b>6,3</b>
Bestand 2030 AFV gesamt	727.000	83.000	37.000	19.000	113.000	<b>979.000</b>
Anteil AFV am Bestand 2030	33 %	38 %	37 %	30 %	47 %	34 %
EEV-Einsparung gesamt 2030 (TWh)	4,1	1,0	0,3	0,2	1,4	<b>7,0</b>
CO <sub>2</sub> -Emissionsreduktion ges 2030 (Mio. t CO <sub>2</sub> )	2,6	0,6	0,7	0,5	6,7	<b>11,2</b>
CO <sub>2</sub> -Emissionen ohne alternative Antriebe Bestand 2030 (Mio. t CO <sub>2</sub> )	8,3	2,7	2,6	3,9	25,6	43,1
mittlere JFL (km)	18.872	35.315	54.459	63.901	113.914	

CO<sub>2</sub>-Reduktion gesamt:

**25,9 %**

### Sensitivitäten mit Einfluss auf mehrere Antriebsarten

In den Sensitivitätsrechnungen werden sämtliche Energieträgerpreise aus Tabelle 8 variiert. Die beiden Preise mit dem größten Einfluss auf den Fahrzeugbestand mehrerer An-

<sup>13</sup> HO-Lkw werden nur in GK4 und bei SZM berücksichtigt und deshalb hier nicht angegeben.

triebsarten hat die Variation des Diesel- und des Gaspreises. Dieser ist in Abbildung 34 dargestellt als Änderung im Fahrzeugbestand (y-Achse) bei Variation der Einflussgröße (x-Achse) für den Dieselpreis (links) und den Gaspreis (rechts).

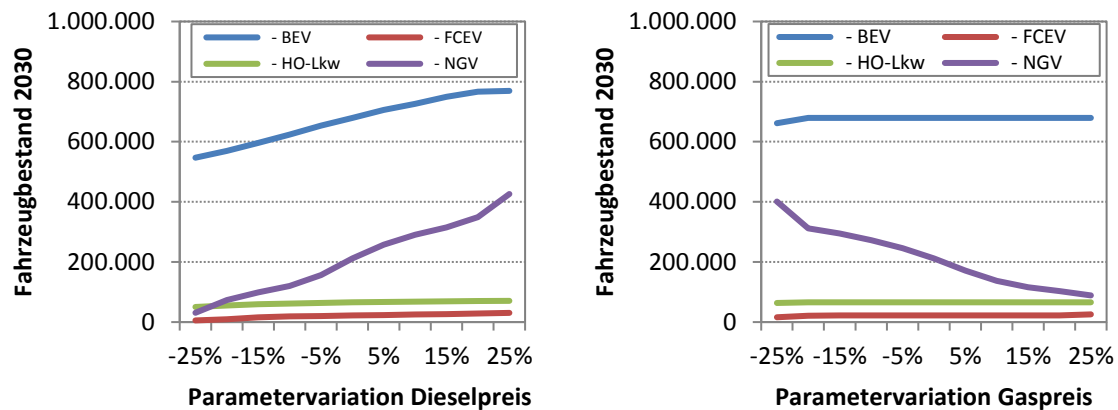


Abbildung 34: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Diesel- und Gaspreisvariation

Man erkennt in der linken Hälfte der Abbildung, dass die BEV und NGV durch ein geringeres bzw. höheres Wachstum des Dieselpreises beeinflusst werden. Das heißt, bei einer Dieselpreissteigerung von +25 % gegenüber dem ursprünglich angenommenen Wachstum auf 1,53 €/l (ohne MwSt.) wird eine Erhöhung auf 1,91 €/l (ohne MwSt.) im Jahr 2030 angenommen. Hieraus würde eine Steigerung des BEV-Bestands um 25 % (auf knapp 750.000 BEV) und eine Erhöhung des NGV-Bestands um 100 % (auf rund 400.000 Fahrzeuge) resultieren. Ein geringeres Wachstum des Dieselpreises auf 1,15 €/l (ohne MwSt.) würde zu einer Reduktion der Fahrzeugbestände dieser beiden Antriebsarten in gleicher Höhe führen (NGV: -100 %, BEV: -25 %). Die Fahrzeugzahlen der FCEV und HO-Lkw werden im Jahr 2030 durch die Dieselpreisänderungen von +/-25 % kaum beeinflusst. Der Einfluss einer Dieselpreisvariation auf die EEV-Einsparung (auf 5 TWh im Jahr 2030, ohne Abbildung) ist vor allem geprägt durch die Zunahme an NGV, welche die Einsparung aufgrund ihrer geringeren Energieeffizienz im Vergleich zum Dieselfahrzeug reduzieren. Hingegen steigt die Emissionsminderung durch die zusätzlichen Gasfahrzeuge deutlich an (auf 15 Mio. t CO<sub>2</sub>, vgl. vorangegangenen Abschnitt). Interessant ist, dass nur bei der Energieeffizienz Kannibalisierungseffekte (Verschiebung vom einen zum anderen alternativen Antrieb) zwischen den Antrieben auftreten, die Erhöhung des Dieselpreises aber in jedem Fall zu einer Vermehrung der Fahrzeugzahl aller alternativen Antriebe und einer höheren CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung führt.

Die Veränderung des Gaspreises in der rechten Hälfte von Abbildung 34 hat vornehmlich Auswirkungen auf die Zahl der NGV im Jahr 2030: eine Reduktion des Gaspreises um 25 % im Jahr 2030 (1,11 €/kg anstatt 1,48 €/kg, ohne MwSt.) führt zu einer Verdopplung der Gasfahrzeugzahl, eine Erhöhung um 25 % (1,85 €/kg, ohne MwSt.) zu einer Halbierung. Bei einem Gaspreis unterhalb von 1,25 €/kg ist hier ein leichter Kannibalisierungseffekte



effekt durch die leichte Reduktion des BEV-Bestands zu erkennen. Die Effekte auf die EEV-Einsparung und die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung sind analog zur Sensitivität des Dieselpreises.

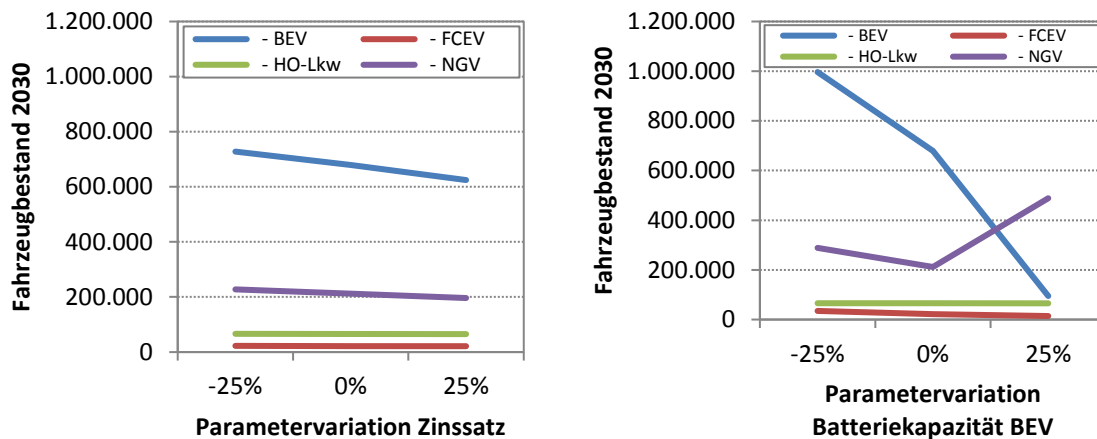


Abbildung 35: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Zinssatz- und BEV-Batteriekapazitätsvariation

Ebenfalls Einfluss auf alle Antriebsarten hat die Variation des angenommenen Zinssatzes (5 % im Jahr 2030) und der Batteriekapazitäten für BEV (vgl. Abschnitt 5.2), die in Abbildung 35 dargestellt ist. Der Zinssatz hat demnach eine Reduktion aller alternativen Antriebe zur Folge, allerdings sind BEV und NGV stärker davon betroffen. Das liegt insbesondere an der hohen Marktdurchdringung in den kleineren Größenklassen, in denen die Investition und damit der Zinseffekt im Verhältnis zu den laufenden Kosten eine größere Rolle spielt als bei den größeren Lkw. Das liegt vor allem an den unterschiedlichen Fahrleistungen (durchschnittlich 114.000 km/a für Sattelzugmaschinen gegenüber 19.000 km/a für GK1). Jedoch ist der Einfluss des Zinssatzes in Summe geringer als der Diesel- oder Gaspreis, was die hohe Wichtigkeit der laufenden Kosten nochmals bekräftigt. Die EEV-Einsparung und die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung sind kaum von dieser Variation betroffen (Veränderung von maximal 5 %).

Verringert man die Batteriekapazitäten der BEV 2030 in allen Größenklassen (rechte Seite Abbildung 35), so steigt ihre Anzahl deutlich an, da nun die Amortisation nicht mehr so lange dauert (die kleineren Batterien sind günstiger). Allerdings können einige Fahrzeuge aufgrund der geringeren Reichweite nicht mehr mit einem BEV bedient werden, womit der Zuwachs an Gasfahrzeugen zu erklären ist, auch FCEV profitieren leicht davon. Eine Erhöhung der Batteriekapazitäten von BEV im Jahr 2030 führt zu einer Reichweitenverlängerung, allerdings auch zu einer Verteuerung, was sich in einer deutlichen Reduktion des Fahrzeugbestands (-85 %) niederschlägt. Da die BEV-Fahrzeuge nun auch mehr fahren müssen, um ihre höhere Investition für die Batterie zu amortisieren, stehen sie in Konkurrenz zu FCEV und reduzieren deren Bestand um gut 25 %. Profiteur der Batterie-

kapazitätserhöhung sind die Gasfahrzeuge, die deutlich Marktanteile von BEV gewinnen und ihren Bestand um 150 % auf eine halbe Million im Jahr 2030 steigern.

Während also deutliche Änderungen des Gesamtbestands der alternativ angetriebenen Fahrzeuge durch diese Sensitivität resultieren, ändert sich die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion nur minimal (bei -25 % Batteriekapazitäten der BEV: 11,6 Mio. t CO<sub>2</sub>, bei +25 %: 10,5 Mio. t CO<sub>2</sub>), und die EEV-Einsparung ist nur bei einer Erhöhung der BEV-Batteriekapazitäten deutlich betroffen (bei -25 % Batteriekapazitäten der BEV: 7,0 TWh, bei +25 %: 3,5 TWh), was wiederum an der starken Zunahme der NGV liegt.

### Sensitivitäten mit Einfluss auf einzelne Antriebsarten

Einige Parameter haben insbesondere Einfluss auf die Entwicklung einzelner Antriebsarten, wohingegen die Entwicklung der anderen Fahrzeugantriebsarten wenig berührt ist. Dies sind für die BEV die Variation der Parameter Batteriekosten und Batterielebensdauer sowie für die FCEV die BZ-Systemkosten, die Kosten für den Druckgastank, die Lebensdauer des BZ-Stacks, die Lebensdauer des Druckgastanks und der Wasserstoffpreis (vgl. Wietschel et al. 2017, Kapitel 3).

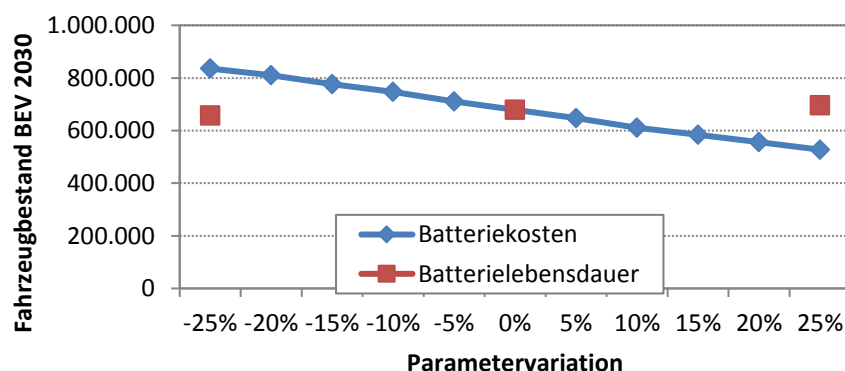


Abbildung 36: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Batteriekosten und -lebensdauern

Der Bestand von BEV im Jahr 2030 erhöht sich bei einer stärkeren Reduktion der Batteriekosten (140 €/kWh anstatt 186 €/kWh, ohne MwSt.) auf bis zu 840.000 BEV (+23 %). Eine höherer Batteriepreis im Jahr 2030 (233 €/kWh) hat eine Reduktion in ähnlicher Höhe zur Folge. Hier wird nochmals deutlich, dass für BEV die Fahrzeuginvestition eine Rolle spielt, da eher kleinere Fahrzeuge mit geringeren Fahrleistungen ersetzt werden. Die Batterielebensdauer, welche direkt in die Wartungs- und Instandhaltungskosten einfließt, hat hier geringeren Einfluss (+/-3 %).

Für Brennstoffzellenfahrzeuge werden eine Reihe von Parametern untersucht, die Investition und laufende Kosten der Fahrzeuge beeinflussen. Man kann deutlich sehen, dass der Wasserstoffpreis (neben dem bereits oben genannten Dieselpreis) der wichtigste Einfluss-

faktor auf die Bestandsentwicklung der FCEV bis 2030 ist (bei einem Wasserstoffpreis von 5 €/kg kann der Fahrzeugbestand auf rund 60.000 FCEV im Jahr 2030 ansteigen, bei einem Preis von 8,30 €/kg ist er bei nahezu null Fahrzeugen im Bestand 2030). Dieser beeinflusst ausschließlich die laufenden Kosten, während die anderen Parameter die Investition der Fahrzeuge adressieren und kaum Einfluss haben. Dies liegt vor allem daran, dass FCEV insbesondere in Fahrzeugen mit sehr hohen Jahresfahrleistungen ökonomisch attraktiv sind, da dann die Mehrinvestition gegenüber den Konkurrenztechnologien (hier vor allem NGV, ansonsten auch Diesel) amortisiert werden können. Da die Kilometerkosten mit einem FCEV und einem NGV unter den getroffenen Annahmen sehr nah beieinander liegen, muss diese Technologie vor allem als Konkurrenz betrachtet werden.

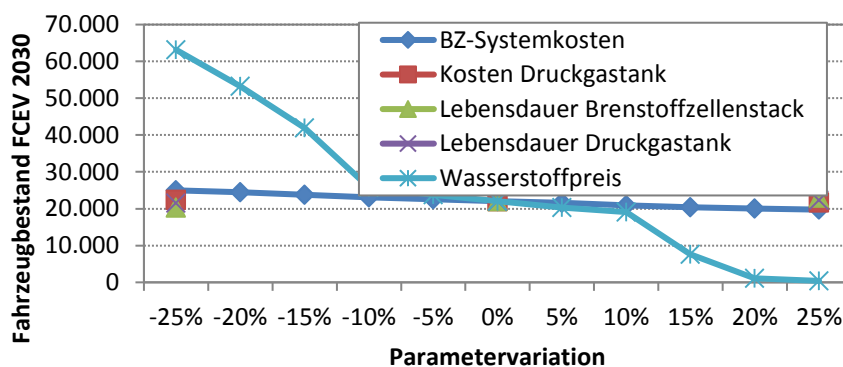


Abbildung 37: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für verschiedene BZ-Parameter

### Variationsrechnungen

Weiterhin wird untersucht, welchen Einfluss bestimmte Bemessungsgrundlagen haben. Hierfür wird zunächst ein Szenario berechnet, in dem Energieträgerpreise ohne Energiesteuern und -abgaben verwendet werden (vgl. Tabelle 8). Weiterhin werden verschiedene Varianten der Emissionsbewertung der alternativen Antriebe untersucht (siehe zur Begründung Kapitel 3.1.4 und 3.2.1) und zu guter Letzt erneuerbares Methanol als Alternative zu Gas analysiert.<sup>14</sup>

Die bisherige betriebswirtschaftliche Bewertung hat die Sicht der Käufer von Fahrzeugen im Blick. Dabei sind volkswirtschaftliche Aspekte wie Finanzmarktbedingungen, Steuern, Abgaben und Subventionen vorgegebene, exogene Größen, die in die Bewertung einfließen. In einer volkswirtschaftlichen Bewertung stellt sich die Frage, wie die Volkswirtschaft im Sinne einer optimal funktionierenden Gesamtwirtschaft unter vorgegebenen Zielgrößen wie Erreichung von Klimaschutzzielen aussehen sollte. Volkswirtschaftliche Größen wie

<sup>14</sup> Diese Option war zu Beginn des Projekts nicht Bestandteil der Betrachtung, wurde aber auf Wunsch der Teilnehmer des ersten Workshops als Zusatzoption hinzugezogen (Wietschel et al. 2016).

Steuern und Zinsen werden dabei als Steuerungsoptionen für das Handeln von Unternehmen gesehen, die entsprechend zu setzen sind. Hier erfolgt nun der Blickwechsel auf die volkswirtschaftliche Perspektive, in der sich die Frage stellt, welche alternativen Antriebe sich dafür anbieten, die energie- und klimapolitischen Ziele aus einer volkswirtschaftlichen Perspektive am sinnvollsten zu erreichen. Da direkte und indirekte Steuern, Abgaben und Subventionen nur einen Transfer von Finanzmitteln zwischen Haushalten und Unternehmen sowie dem Staat darstellen, werden sie nicht als volkswirtschaftliche Kosten betrachtet. Dies ist eine übliche Vorgehensweise bei derartigen Fragestellungen, siehe z. B. Ostertag et al. (2000). Die volkswirtschaftlichen Kosten werden unabhängig davon ermittelt, welche Akteure damit belastet werden. Derartige Verteilungseffekte werden hier nicht behandelt. Ebenfalls nicht thematisiert werden makroökonomische Effekte. Diese umfassen gesamtwirtschaftliche Auswirkungen auf Investitionen, Umsatz, Importe, Bruttoinlandsprodukt und Beschäftigung.

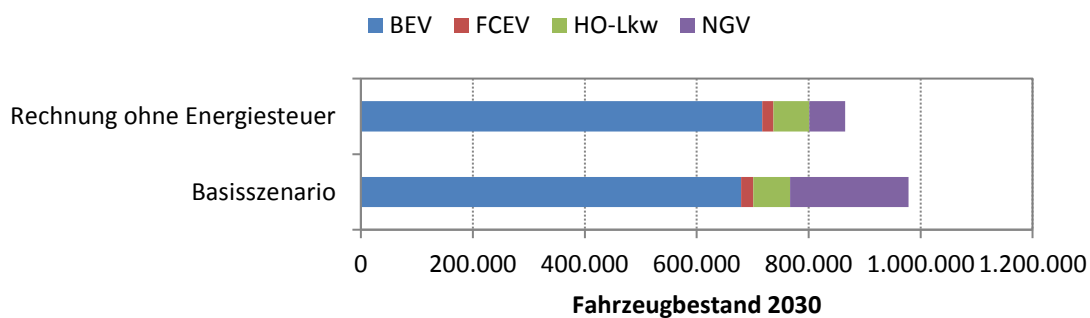


Abbildung 38: Vergleich der Rechnungen mit und ohne Energiesteuern für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030

Die Rechnung ohne Energiesteuern und -abgaben für das Jahr 2030 zeigt die folgenden Effekte. Der Fahrzeugbestand der alternativen Antriebe 2030 verringert sich leicht, weil die höchsten Energiesteuern heute für Diesel gelten und diese Antriebsart damit am meisten von einer Energiesteuerbefreiung profitiert. Außerdem ist eine leichte Zunahme bei BEV und eine deutliche Reduktion bei NGV zu verzeichnen, die Marktanteile an Diesel und BEV verlieren. Nahezu unbetroffen ist der Markthochlauf der HO-Lkw und der FCEV. Für die EEV-Einsparung ist aufgrund der Reduktion der NGV eine leichte Verbesserung, für die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion eine leichte Verschlechterung zu verzeichnen. Damit zeigt diese Analyse, dass sich die Ergebnisse in der Rechnung mit und ohne Energiesteuer nur unwesentlich unterscheiden, wobei vor allem Gasfahrzeuge von der derzeitigen Energiebesteuerung profitieren.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Hierbei muss nochmals angemerkt werden, dass die Steuerreduktion für Gasfahrzeuge in dieser Studie bereits für das Jahr 2030 ausgesetzt wurde und Erdgas voll versteuert wird. Auch dann ergeben sich noch steuerliche Vorteile.

Die zweite zu beachtende Variation ist die der Emissionsbewertung der Kraftstoffe von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.<sup>16</sup> Der Strom, der in den elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (BEV, HO-Lkw) und FCEV (zur Herstellung von Wasserstoff) verwendet wird, kann unterschiedlich hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet werden. Da diese in die laufenden Kosten der TCO-Rechnung einbezogen werden, kann dies zu großen Unterschieden führen. Grundsätzlich sind drei Arten von Emissionsbewertungen für Strom von neuen Energieträgern zu unterscheiden:

- Nullemissionen: Der Strom, der in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben genutzt wird, wird mit „null“ Emissionen bewertet.
- Durchschnittsemissionen: Der Fahrstrom wird mit den durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung bewertet. Diese Bewertung wird in der Basisvariante berücksichtigt.
- Grenzemissionen: Da für den zusätzlichen Strom der neuen Energieabnehmer Kraftwerke zugeschaltet werden müssen, werden diese mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Grenzkraftwerke bewertet. Weil dies in der Regel fossile Kraftwerke sind<sup>17</sup>, sind diese entsprechend höher als die Grenzemissionen.

Die Durchschnitts- und Grenzemissionen werden mit dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Fundamentalmodell berechnet.

Für die TCO-Rechnung ist ebenfalls relevant, welche Kosten für die CO<sub>2</sub>-Zertifikate angesetzt werden. Hier werden Varianten von 0 €/t CO<sub>2</sub>, 100 €/t CO<sub>2</sub> und 200 €/t CO<sub>2</sub> unterschieden, die Werte für die Emissionen der Stromerzeugung finden sich in Tabelle 8. Dies bildet den Einfluss von Klimapolitiken ab. In den sogenannten Klimaschutzszenarien des BMUB bildet sich bei einem 95-prozentigen THG-Minderungsziel im Jahre 2050 ein CO<sub>2</sub>-Preis von 200 €/t heraus, im 89-%-Minderungsszenario ein Preis von 50 €/t (Repenning et al. 2014).

Die Ergebnisse der Variationsrechnung in Bezug auf den Fahrzeugbestand finden sich in Abbildung 39 in allen sinnvollen Kombinationen im Vergleich zum Basisszenario (Durchschnittsemissionen und 100 €/t für CO<sub>2</sub>).

---

<sup>16</sup> Vgl. hierzu auch Abschnitt 3.2.1.

<sup>17</sup> Erneuerbare Kraftwerke haben variable Kosten von annähernd null, während fossile Kraftwerke variable Kosten aufweisen. In der Merit-Order-Kurve (Grenzkostenkurve) der Kraftwerke liegen die fossilen Kraftwerke immer hinter den Erneuerbaren, das heißt sie bilden i.d.R. das sogenannte Grenzkraftwerk. Bei den Durchschnittsemissionen werden die Emissionen aller Kraftwerke gemittelt, d. h. die der Erneuerbaren wie der Fossilen.

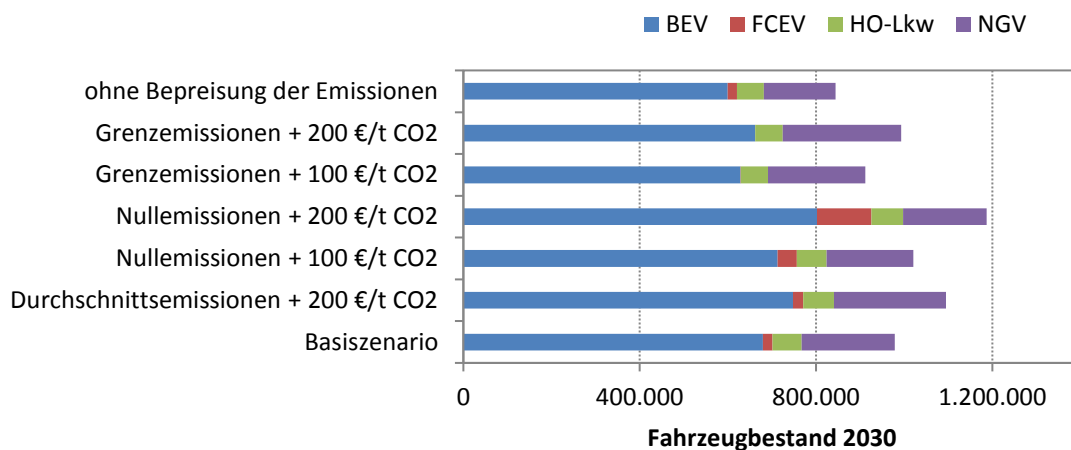


Abbildung 39: Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungsgrundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030

Die erste Variation ist die Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises und Beibehaltung der Durchschnittsbewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Hier werden vor allem die Dieselfahrzeuge belastet, was zu einer Erhöhung der Anteile für NGV und BEV führt, die geringere Belastungen haben; die Marktanteile von FCEV und HO-Lkw sind davon nicht betroffen. Die Bewertung des Fahrzeugstroms mit Nullemissionen und einem CO<sub>2</sub>-Preis von 100 €/t bewirkt nahezu keine Veränderung gegenüber dem Basiszenario, einzig die FCEV gewinnen leicht hinzu. Wird der CO<sub>2</sub>-Preis jedoch auf 200 €/t erhöht, dann steigt vor allem der Bestand der FCEV (+500 %), die deutlich von der Emissionsabgabe der anderen Fahrzeuge profitieren.<sup>18</sup> Auch der BEV-Bestand erhöht sich in diesem Fall um 20 %, während die anderen Antriebsarten unberührt bleiben. Wird für die Bewertung des Fahrstromes die Grenzemissionsbetrachtung zugrundegelegt, so finden sich bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 100 €/t einige BEV weniger im Bestand (-7 %), der FCEV-Bestand bricht aber bis auf sehr wenige Lkw fast vollständig ein (1.000 Lkw im Bestand 2030). Bei einer höheren Bepreisung von CO<sub>2</sub> mit 200 €/t können FCEV sich nicht mehr durchsetzen (hier sind die Umwandlungsverluste im Vergleich zu allen anderen Antriebsarten zu hoch), während der BEV-Bestand steigt, da auch Dieselfahrzeuge stärker belastet werden. Eine Nichtberücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionen als Abgabe führt zu leichten Reduktionen der Bestände von NGV und BEV.

Es lässt sich demnach festhalten, dass die Abgabe für CO<sub>2</sub> und ihre Bemessungsart am meisten Auswirkungen auf FCEV hat. Hier ist mit einer deutlich höheren Marktdurchdringung zu rechnen, wenn für FCEV keine Emissionsabgabe (aufgrund der lokalen Nullemissionen) gezahlt werden muss, während dies für Dieselfahrzeuge der Fall ist. Weniger stark betroffen sind davon BEV und NGV, bei denen die Schwankungen durch die Verän-

<sup>18</sup> Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Antriebsarten sind in Abschnitt 3.1.4 dargestellt.

derungen in der CO<sub>2</sub>-Bewertung bei 10 bis 20 % liegen. Der Bestand der HO-Lkw ist von der CO<sub>2</sub>-Emissionsbewertung quasi unberührt (Schwankungen bis maximal 5 %).

Als letzte Variationsrechnung wird der Einsatz von synthetisch erzeugtem Methanol anstelle von NGV betrachtet.<sup>19</sup> Wenn Methanol mit erneuerbarem Strom erzeugt wird (eine der sogenannten Power-to-Liquid (PtL) Optionen), so können die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich geringer als bei anderen Antriebsarten ausfallen. Deshalb werden in dieser Variationsrechnung ebenfalls die CO<sub>2</sub>-Bewertungsmethoden variiert.

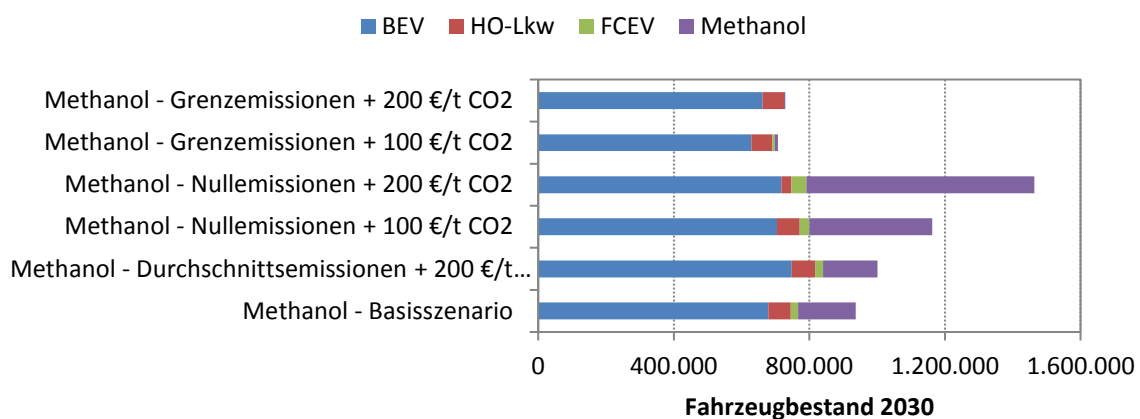


Abbildung 40: Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungs-Grundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 unter Einbezug von synthetisch erstelltem Methanol

Die Veränderungen in der Bewertung bei den Emissionen sind dabei ähnlich wie zuvor bei Wasserstoff. Wird der Strom zur Herstellung mit Nullemissionen bewertet, erhöht sich die Anzahl der Methanolfahrzeuge deutlich (+300 % bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 100 €/t), während diese bei der Ansetzung der Grenzemissionen vollständig aus dem Bestand verschwinden. In späteren Studien sollte diese Technologie also detaillierter untersucht werden.

### 3.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Markthochlaufs basieren auf einer TCO-Rechnung, die um die beschränkte Fahrzeugverfügbarkeit und die Beschränktheit durch einen Oberleitungsausbau nur in Deutschland statt europaweit erweitert wurde. Hierbei ist anzumerken, dass ein Ansatz zur Berechnung des Marktpotentials auf Basis einer TCO-Rechnung nicht alle Aspekte einer Kaufentscheidung abbildet (vgl. hierzu die Diskussion in Plötz et al. 2013), allerdings spielt bei den hier betrachteten gewerblichen Pkw-Nutzern der Kostenaspekt

<sup>19</sup> Die spezifischen Emissionen werden mit 0,320 kg CO<sub>2</sub>/kWh für Durchschnittsemissionen, der Verbrauch und die Fahrzeugkosten wie bei Gasfahrzeugen angenommen und ein Methanolpreis von 1,44 €/kg Methanol im Jahr 2030 angesetzt.

eine größere Rolle als bei privaten (vgl. Globisch et al. 2013) und insbesondere im Lkw-Bereich ist der Kostendruck für Logistikunternehmen entscheidend. Ein TCO-Ansatz sollte demnach wichtige Hinweise auf Marktpotentiale geben. Die Beschränkung durch das Fahrzeugangebot und den Ausbau von Infrastruktur reduziert zudem den rein kostenmäßig ermittelten Marktanteil und bildet somit einen Teil der Hemmnisse aus Sicht der Fahrzeughalter ab.

Zu diskutieren ist ebenfalls, ob sich die Vielzahl der alternativen Antriebe in den Szenarien durchsetzen wird (Pluralismus der alternativen Antriebe), oder ob einer sich gegen die anderen durchsetzen wird (Dominanz eines alternativen Antriebs). Hierzu sei angemerkt, dass kein einzelner alternativer Antrieb die Ergebnisse dominiert. Während der WtW-Wirkungsgrad bei stromgetriebenen Antrieben eindeutig am höchsten ist, sind Fahrzeuge mit Batterie reichweitenbeschränkt und kommen auf Basis der getroffenen Annahmen nicht für Fahrzeuge mit Langstreckenbetrieb in Betracht. Diese Limitationen sind bei Brennstoffzellenfahrzeugen geringer, jedoch ist der Wirkungsgrad für CO<sub>2</sub>-neutral erzeugten Wasserstoff deutlich kleiner. Gas- und dieselbetriebene Fahrzeuge haben diese Limitationen nicht, jedoch sind diese aus ökologischer Sicht nicht vorteilhaft. Für alle alternativen Antriebe bedarf es zunächst eines Aufbaus einer zu Beginn unterausgelasteten und damit defizitären Infrastruktur. Ein primär kostengetriebenes Ergebnis würde die alternativen Antriebsarten analog zum Basisszenario untergliedern, das in Abbildung 41 nochmals gemäß der Anteile im alternativen Fahrzeugbestand aufgeteilt dargestellt ist.

Abbildung 41 zeigt die Marktanteile am alternativen Fahrzeugbestand im Jahr 2030 im Basisszenario unterteilt nach Größenklassen. Hier ist klar zu erkennen, dass die Reichweiten-limitierten BEV eher in den kleinen Größenklassen einzusetzen sind, in denen auch weniger gefahren wird (vgl. Tabelle 1). Die nicht Reichweiten-beschränkten Gasfahrzeuge sind in allen Größenklassen vertreten und ersetzen vor allem Fahrzeuge mit größeren Jahresfahrleistungen als BEV. Noch höhere Jahresfahrleistungen werden von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle (bis zum Reichweiten-Limit) oder HO-Diesel-Lkw ersetzt, die ihre Mehrinvestition mit den Verbrauchsvorteilen kompensieren können.

Behält man also eine rein kostengetriebene Sicht bei, so kann eine radikale Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht erreicht werden. Ein Pluralismus der alternativen Antriebsarten erscheint jedoch auch auf lange Sicht sinnvoll, wenn nur noch emissionsfreie Antriebe eingesetzt werden dürfen. Dann kann die Direktnutzung von Strom über Batterien in Fahrzeugen mit kleinen Bewegungsradien eine Alternative zu Dieselfahrzeugen sein, für die mittleren Strecken können gasförmige und für sehr große Reichweiten flüssige Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Eine Differenzierung der Antriebsarten erscheint aus heutiger Sicht sinnvoll und angebracht. Nicht in die Betrachtung einbezogen wurde allerdings die Frage, ob die Stückzahlen für die alternativen Antriebe ausreichen, damit die Lkw-Hersteller rentabel arbeiten können und die Kostendegressionen über Skalen- und Lerneffekte erreicht werden. Hierfür wären weltweite Betrachtungen notwendig.



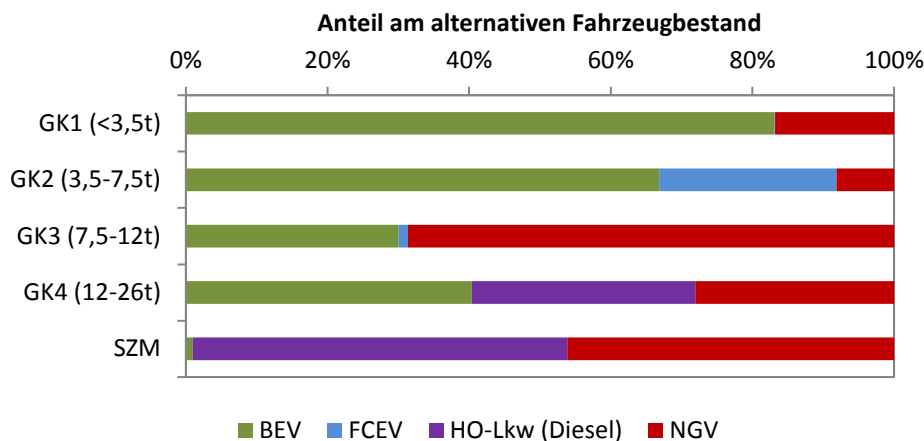


Abbildung 41: Anteile der verschiedenen alternativen Antriebsarten am alternativen Fahrzeugbestand im Jahr 2030 im Basisszenario unterteilt nach Größenklassen

### 3.2.5 Zusammenfassung der Markthochlaufergebnisse

Im Rahmen der Markthochlaufberechnungen wurde eine Reihe an Ergebnissen dargestellt, deren wichtigsten Punkte in Bezug auf BZ-Lkw hier nochmals zusammengefasst werden sollen.

1. BZ-Lkw haben die größten Marktpotentiale eher in den kleinen Größenklassen, aber verschiedene Technologien stellen dabei eine Konkurrenz dar:
  - Gasfahrzeuge sind die größte Konkurrenz in allen Größenklassen (niedrigere Investitionen, aber meist höhere Verbrauchskosten).
  - In den kleinen Größenklassen sind zudem BEV eine Konkurrenztechnologie.
  - In GK4 und GK5 könnten HO-Lkw eine alternative Technologie sein.
2. Die Marktanteile für BZ-Lkw liegen bei 1 bis 3 % im Bestand 2030 und bis zu 20 % bei den Neuzulassungen in der GK 2 und können durch Verdrängung anderer Technologien größer sein (25%, wenn Gasfahrzeuge vollständig verdrängt werden). Weitere Wachstumspotentiale werden nach 2030 erwartet, die insbesondere bei einer verstärkten Dekarbonisierungsstrategie ausgeschöpft werden sollten.
3. Die Nichtberücksichtigung der Emissionen führt zu keiner signifikanten Veränderung, aber bei Bewertung mit Nullemissionen oder Grenzemissionen ändern sich die Potentiale deutlich.
4. Die Marktanteile sind weniger durch die genauen technischen Parameter als durch mögliche Konkurrenztechnologien und Energiepreise determiniert.



## 4 Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen

Zusammen mit den Erkenntnissen über den aktuellen Stand der Forschung bei Pkw, Bussen und Lkw werden im Folgenden basierend auf den Marktpotentialen für BZ-Lkw und den Lkw-spezifischen Anforderungen an die Brennstoffzelle FuE-Bedarfe für BZ-Lkw abgeleitet. Diese beziehen sich zunächst auf alle Fahrzeugkategorien (Busse, Pkw und Lkw) und die damit verbundenen Synergien. Anschließend werden die Anforderungen speziell für Lkw und für schwere Lkw ermittelt. Insgesamt lassen sich daraus neun zentrale FuE-Bedarfe ableiten.

### 4.1 Externe Einflussfaktoren

Neben der Brennstoffzellenentwicklung beim Lkw existieren auch Einflussfaktoren auf die Marktdiffusion, die zunächst keinen direkten Zusammenhang zur Forschung und Entwicklung aufweisen. Dazu gehört einerseits die Entwicklung der Konkurrenztechnologien, welche die Attraktivität der BZ-Lkw am Markt mitbestimmt, und andererseits die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die eine Marktdiffusion des BZ-Lkw beschleunigen oder bremsen können.

#### 4.1.1 Konkurrenztechnologien

Das auf Basis des TCO-Modells (vgl. Kapitel 3) ermittelte Marktpotential von BZ-Lkw beträgt im Jahr 2030 etwa 2 bis 3 % des Bestandes bei Lkw unter 12 Tonnen zGG. Besonders bei jährlichen Fahrleistungen zwischen 40.000 und 70.000 km liegen die TCO-Werte aller Technologien in sehr ähnlichen Größenordnungen (vgl. Abbildung 42). Dies bedeutet, dass schon leichte Kostensenkungen bei Produktion und Entwicklung deutliche Verschiebungen bei den Marktpotentialen zur Folge haben können. Bei der Entwicklung der Brennstoffzellen-Lkw sind daher stets die Konkurrenztechnologien zu berücksichtigen. Im Verteilerverkehr sind dies vor allem Batterie-Elektrische-Lkw (BEV) und Antriebssysteme mit CNG als Kraftstoff.

Bei Lkw über 12 Tonnen zGG lassen sich derzeit im TCO-Modell keine Marktpotentiale für BZ-Lkw erkennen. Die Kosten liegen stets über den TCO der Diesel-, LNG- und über den HO-Lkw. Dazu führen die schweren und großvolumigen Tanksysteme zu Nutzlast- und -volumeneinbußen.

Unabhängig von Größenklassen und Jahresfahrleistung stehen die BZ-Lkw stets in direkter Konkurrenz zu Erdgaslösungen (CNG, LNG). Daher ist es von besonderem Belang, wie sich die TCO dieser Antriebe entwickeln werden. Hierbei sind die erreichbaren Skaleneffekte bei der Produktion entscheidend. Die Kostensenkungspotentiale sind derzeit schwer abzuschätzen. Ebenso ungeklärt ist die zukünftige Besteuerung von CNG/LNG (derzeit steuerfrei) und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Kraftstoffkosten. Zudem werden auch durch CNG/LNG-Lkw fahrzeugseitige CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt.

Es kann daher zukünftig durchaus zu gesetzlichen Beschränkungen kommen, welche konventionelle Antriebe verteuern und damit die BZ-Lkw begünstigen könnten. Dennoch sind technologische und ökonomische Entwicklungen bei allen Antriebstechnologien zu beobachten und bei der Entwicklung der BZ-Lkw zu berücksichtigen.

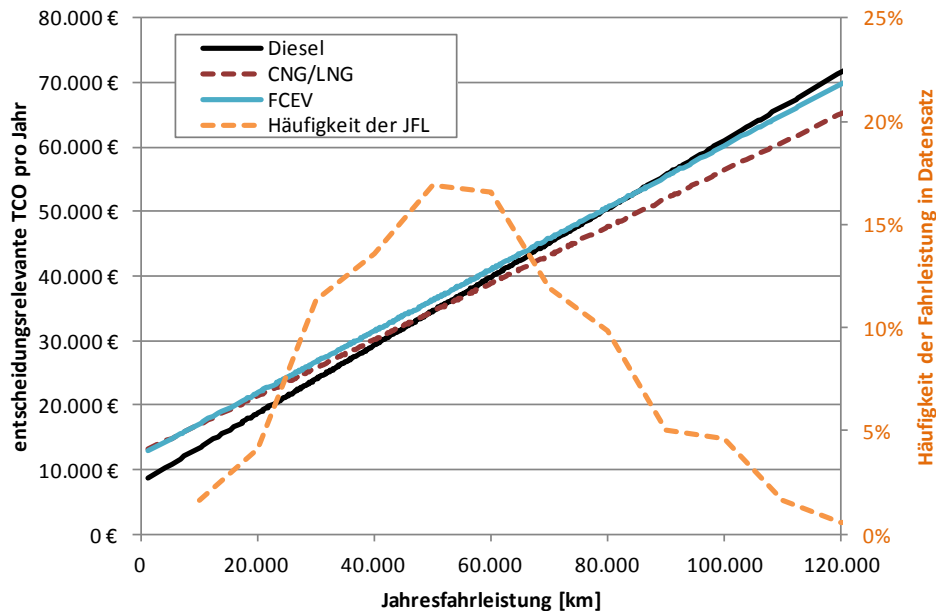


Abbildung 42: TCO im Jahr 2030 (Modellergebnisse)

#### 4.1.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen können die Diffusion alternativer Antriebstechnologien hemmen oder beschleunigen. Derzeit werden Lkw durch Gesetze und Richtlinie wie folgt beeinflusst: Die EURO-Abgasnormen schreiben die Menge der maximal emittierbaren Luftschadstoffe pro eingesetzter Motorleistung vor (kW). Die Straßenverkehrs-zulassungsverordnung (StZVO, § 34) beschränkt die maximale Länge und das zulässige Gesamtgewicht der Lkw.

Im Unterschied zu Pkw bestehen bei Lkw derzeit keine Flottengrenzwerte, da die Verbrauchsmessung nicht über den NEFZ erfolgen kann. Die Gründe dafür liegen in der Heterogenität der Größenklassen bei Lkw (7,5 t bis 40 t zulässiges Gesamtgewicht), der Aufbauarten (z. B. Kipper, Seitenplaner) sowie den Fahrprofilen (z. B. Verteilerverkehr, Fernverkehr). Deshalb wurde unter der Federführung der TU Graz speziell für den Lkw ein Prüfzyklus zur Verbrauchsmessung entwickelt (vgl. Fontaras et al. 2014). Es wird folglich zukünftig möglich sein, Emissionsgrenzwerte für Lkw-Flotten festzulegen und zu überprüfen. Da im Verkehr als Systemgrenze bei der Emissionsmessung stets das Fahrzeug verwendet wird, könnten durch eine Absenkung der Emissionsgrenzwerte alternative

Antriebstechnologien mit fahrzeugseitigen Nullemissionen (z. B. Brennstoffzelle, batterieelektrische Lkw, Oberleitungs-Lkw) profitieren.

Neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen rückte bei den Dieselmotoren in den letzten Jahren der Luftschadstoffausstoß zunehmend in den Fokus der Politik. Feinstaub und NO<sub>x</sub>-Grenzwerte werden an den Messstationen in den Städten vermehrt überschritten, was zu einem Handlungsdruck auf Städte und Gemeinden führt. Die daraus potentiell folgenden Einfahrverbote für Dieselfahrzeuge werden im Verteilerverkehr die Diffusion von alternativen Antriebstechnologien mit fahrzeugseitigen Nullemissionen (z. B. Brennstoffzellen- und batterieelektrische Lkw) deutlich verstärken.

Da neue Antriebe und die damit verbundenen Energiespeichertechnologien (z. B. Batterie, Wasserstofftank) derzeit ein Mehrgewicht gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb aufweisen, veröffentlichte die Europäische Kommission im Jahr 2015 eine Richtlinie, welche die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes der Fahrzeuge beim Einsatz alternativer Antriebe vorsieht. Die Richtlinie (EU) 2015/719 ermöglicht eine Überschreitung des zulässigen Gesamtgewichts um höchstens eine Tonne. Die Fahrzeuglänge darf um 500 mm überschritten werden, um aerodynamische Elemente zur Kraftstoffeinsparung anzubringen. Zukünftig soll darüber hinaus eine aerodynamische Optimierung der Fahrerkabinen ermöglicht werden.

Es existieren demnach derzeit einige gesetzliche Änderungen, welche die Diffusion von BZ-Lkw positiv beeinflussen können. Gleichzeitig werden wohl zukünftig durch geeignete Messverfahren der Druck auf die Lkw-Hersteller, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken, erhöht. Zusätzlich ist derzeit noch unklar, wie Maßnahmen zur Verminderung von Luftschadstoffen in urbanen Räumen gestaltet werden.

## 4.2 Spillover-Effekte aus der Pkw- und Busentwicklung

Die Entwicklung der BZ-Pkw- und -Busse dauert bereits seit Mitte der 1990er Jahre an. In dieser Zeit entstanden erste Prototypen in Form von Transportern. Neben BZ-Anwendungen in Pkw wurden auch früh Stadtbusse mit Brennstoffzellen ausgerüstet. Innerhalb europäisch geförderter Projekte (z. B. Clean Urban Transport for Europe) wurden diese immer wieder im alltäglichen Linienbetrieb in Städten mit unterschiedlichster Topographie getestet. Bei Lkw gab und gibt es derzeit keine groß angelegten Demonstrationsprojekte. Dies liegt auch an den nicht vorhandenen Fahrzeugen.

Um Entwicklungskosten zu sparen und die Marktreife zu beschleunigen sind Spillover-Effekte aus der Bus- und Pkw-Forschung essentiell. Daher sollen im Folgenden Forschungsthemen identifiziert werden, die für Pkw, Bus und Lkw gleichermaßen relevant sind. Dazu zählen:

- Kaltstartfähigkeit
- Lebensdauer

- Produktionskosten
- Volumen Brennstoffzellen
- Standardisierung
- Sicherheitsanforderungen
- Akzeptanz.

Die *Kaltstartfähigkeit* ermöglicht den Betrieb der Brennstoffzelle bei Temperaturen unter null Grad Celsius. In Ländern mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt ist dies für alle Fahrzeugkategorien relevant. Von einem derzeit in der Forschung ausführlich getesteten störungs- und verlustfreien Betrieb der Brennstoffzelle bis  $-20\text{ °C}$  profitieren daher sowohl Pkw und Busse als auch Lkw.

Die *Lebensdauer* der Brennstoffzellen wird in Betriebsstunden gemessen. Da Nutzfahrzeuge als Produktionsmittel eingesetzt werden, werden Bus und Lkw deutlich intensiver genutzt als Pkw. Was bei Pkw als ausreichende Nutzungsdauer gilt, erreicht nicht die Anforderungen für Lkw. Allerdings führen die langen Nutzungsdauern bei Stadtbussen (vgl. (Wietschel et al. 2016b) dazu, dass Spillover-Effekte aus der Busforschung für den Lkw relevant werden. Ziel ist es, einen Wechsel der Brennstoffzelle während der Nutzungsdauer zu vermeiden. Die für Lkw notwendigen 25.000 Betriebsstunden werden bereits heute von Stadtbussen erreicht (vgl. Wietschel et al. 2016b).

Die *Kosten für die Produktion* von Brennstoffzellen liegen aufgrund der geringen Stückzahlen derzeit deutlich über den Produktionskosten für konventionelle Antriebe (vgl. Hülsmann et al. 2014). Die im Vergleich zum Lkw geringe jährliche Fahrleistung der Pkw führen zu einer starken Sensitivität der Gesamtkosten bezüglich der Anschaffungskosten. Diese fällt bei Lkw durch eine etwa fünf- bis zehnmal höhere Jahresfahrleistungen geringer aus (vgl. Abbildung 43). Dennoch profitieren auch Lkw von sinkenden Produktionskosten bei Brennstoffzellen.

Der zum Einbau der Brennstoffzelle benötigte Bauraum (*Volumen*) ist besonders bei den engen Platzverhältnissen im Pkw von Relevanz. Lkw und Busse weisen bauartbedingt grundsätzlich mehr Platz für Motor und Aggregate auf (vgl. Wietschel et al. 2016b), so dass hier der Handlungsdruck geringer ist. Dennoch profitieren auch Lkw durch kompakte Brennstoffzellen, da so der freiwerdende Bauraum anderweitig genutzt werden kann (z. B. Zusatztanks).

Die *Standardisierung* des Kraftstoffs zum optimalen Betrieb der Brennstoffzelle umfasst die Sauberkeit des eingesetzten Wasserstoffs und die damit verbundenen Messung des Sauberkeitsgrades. Dadurch lässt sich ein verschleißarmer Betrieb mit hohem Wirkungsgrad garantieren. Dies gilt für alle Fahrzeugkategorien gleichermaßen.

Die *Sicherheitsanforderungen* an BZ-Fahrzeuge unterscheiden sich nicht zwischen Pkw, Bus und Lkw. Hierbei ist besonders zu erforschen, wann und unter welchen Umständen die  $\text{H}_2$ -Speichertanks bersten.

Letztlich hängt der Erfolg einer neuen Antriebstechnologie immer zu einem entscheidenden Teil von der **Akzeptanz** der Nutzer und dem Umfeld ab. Besonders bei gasförmigen Kraftstoffen (z. B. CNG, H<sub>2</sub>) existieren in der Bevölkerung Vorbehalte. Ob und inwiefern sich diese Vorbehalte zwischen Pkw- und Lkw-Nutzern unterscheiden, ist derzeit noch unklar. Allerdings lassen sich aus den Erfahrungen mit dem Fahrpersonal von Stadtbusen durchaus Erkenntnisse für Lkw ableiten, da auch diese professionell mit der neuen Antriebstechnologie im täglichen Arbeitsablauf konfrontiert sind.

Insgesamt lassen sich aus den Forschungsschwerpunkten für BZ-Pkw und BZ-Busse einige Spillover-Effekte für Lkw generieren. Da die Forschung für neue Antriebstechnologien sehr kostenintensiv ist, wird es unabdingbar sein, diese Synergien zu identifizieren und für die BZ-Lkw-Forschung zu nutzen.

### 4.3 Spezielle Anforderungen für BZ-Lkw

Neben den Spillover-Effekten aus der Pkw- und Busforschung existieren allerdings auch einige Anforderungen, die speziell für den BZ-Lkw gelten. Zusammenfassend bestehen die Unterschiede zum Pkw darin, dass *Lkw mehr fahren als Pkw, an anderen Orten tanken und kaum ausfallen dürfen*. Daher sollten die Spillover-Effekte zwar umfassend genutzt, aber nicht überschätzt werden.

#### 4.3.1 Einfluss von Wirkungsgraden auf TCO

Der mittlere Kaufpreis eines Lkw ist im Vergleich zum Pkw je nach Größenklasse zwischen zwei- (GK2) und dreimal (SZM) höher (vgl. Lastauto Omnibus 2014). Der Kraftstoffverbrauch liegt etwa um das 3- bis 4,5-fache über den Werten von Pkw (vgl. Handbook Emission Factors for Road Transport HBEFA). Lkw fahren etwa vier- bis achtmal soviel wie Pkw (vgl. KBA 2014). Diese Wirkungszusammenhänge beeinflussen die Kostenstrukturen bei Lkw und Pkw (vgl. Abbildung 43). Während bei Pkw bei derzeitigen Dieselpreisen (ca. 0,98 €/l) die Investition etwa 60 % der Gesamtkosten ausmachen, liegen diese beim Lkw unter 20 %. Der Anteil der Kraftstoffkosten ist bei Sattelzügen hingegen mehr als doppelt so hoch wie bei Pkw (vgl. Abbildung 43).

Steigt der Dieselpreis an, wovon zukünftig auszugehen ist, so verschiebt sich bei einem Preis von 1,53 Euro pro Liter Diesel dieses Verhältnis weiter in Richtung der Kraftstoffkosten: Unter diesen Rahmenbedingungen lassen sich bei Sattelzügen etwa die Hälfte der antriebstechnologieabhängigen Kosten den Dieselpreisen zuordnen.

Neben den Kraftstoffkosten beeinflussen die Wirkungsgrade der Antriebstechnologie die Transportkosten entscheidend. Moderne Dieselaggregate laufen bei Sattelzügen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h im optimalen Drehzahlbereich (vgl. Hoepke und Breuer 2013). Die Wirkungsgrade lassen sich daher bei konventionellen Antrieben kaum noch steigern. Brennstoffzellensysteme erreichen derzeit einen Wirkungsgrad von maximal

etwa 59 % (vgl. Yokoyama 2009 und Pehnt/Höpfner 2009). Jede weitere Steigerung des Wirkungsgrades führt zu einer Senkung der variablen Kosten. Mit wachsender Jahresfahrleistung der Lkw kann dies in Kombination mit steigenden Dieselpreisen zu TCO-Vorteilen der BZ-Lkw gegenüber den konventionell angetriebenen Fahrzeugen führen. Inwieweit sich der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs weiter steigern lässt, wird sich zukünftig zeigen. Forschungsaufwendungen, welche den Wirkungsgrad erhöhen, wirken allerdings bei Lkw bedingt durch die Kostenstrukturen stärker als ein Absenken der Produktionskosten und den damit einhergehenden Kaufpreisreduktionen. Für Sattelzüge mit einer Jahresfahrleistung von etwa 130.000 km bedeutet dies, dass eine Steigerung des Wirkungsgrades um 15 % die gleiche Wirkung erzielt als eine Reduktion der Kaufpreise um etwa 40 %.

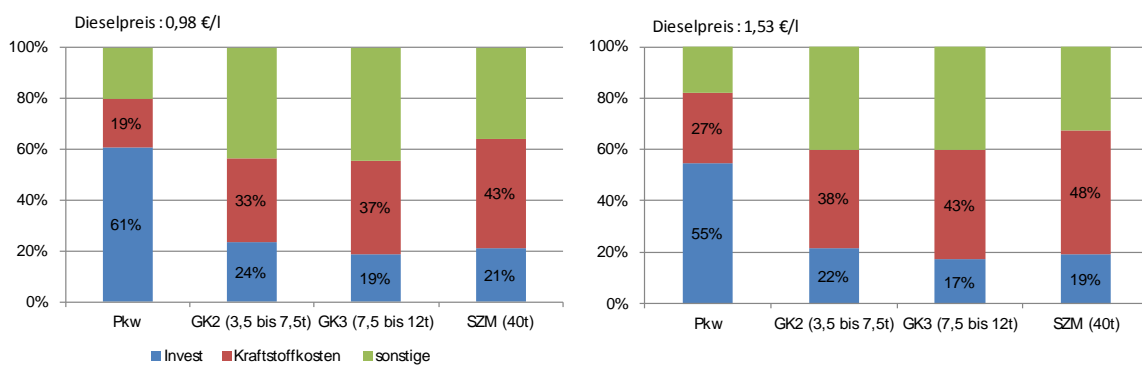


Abbildung 43: Aufteilung der Betriebskosten im Vergleich<sup>20</sup>

### 4.3.2 Einfluss der Betankung

Bisherige Forschungsaktivitäten bezüglich des Ausbaus und des Betriebs der Tankinfrastruktur fokussierten sich stark auf Pkw und Busse. Im Gegensatz zu Pkw und Bussen tanken Lkw jedoch deutlich mehr (10- bis 20-fach mehr als Pkw) und an anderen Orten.

Besonders beim Einsatz von BZ-Stadtbussen befinden sich die Tankanlagen nahezu ausschließlich auf Betriebsgeländen der Betreiber (z. B. Stadtwerke und Verkehrsbetriebe). Pkw tanken hingegen in der Regel in der Nähe von Wohngebieten und an Autobahnen. Im Gegensatz dazu tanken Lkw teilweise auf den Werksgeländen der Transportdienstleister ((private) Kleintankstellen), in Industriegebieten oder entlang von Autobahnen. Die optimalen Betankungsorte, welche für die Nutzer nur geringe Umwege erzeugen, weichen daher zwischen den Fahrzeugkategorien voneinander ab. Derzeit (Stand 2015) existieren in Deutschland 16 Wasserstofftankstellen, weitere 34 sind in Planung (vgl. LBST 2016). Der Abdeckungsgrad ist im Vergleich zu etwa knapp 14.500 Dieseltankstellen und etwa 900 Erdgastankstellen verschwindend gering (vgl. MWV 2016). Zudem weisen die existie-

<sup>20</sup> Quellen und Annahmen: Gnann (2015) sowie Modellergebnisse; JFL: Pkw: 15.000 km/a; GK2: 35.000 km/a; GK3: 55.000 km/a; SZM: 114.000 km/a, Nutzungsdauer: Pkw: 6 Jahre; GK2: 12 Jahre; GK3: 10 Jahre; SZM: 6 Jahre.



renden Wasserstoff-Tankstellen derzeit teilweise noch eine geringe technische Verfügbarkeit auf (vgl. Erfahrungen aus dem Begleitforschungsprojekt des 50-Tankstellen-Programms im Rahmen des NIP). Aus der Akzeptanzforschung bei Pkw ist bekannt, dass beim Besuch von Tankstellen geringe Umwege in Kauf genommen werden. Die Toleranz diesbezüglich liegt bei etwa zehn Minuten (vgl. Ball und Wietschel 2009). Da die Transportdienstleistungsunternehmen unter hohem finanziellen Druck stehen, ist anzunehmen, dass die Akzeptanz von Umwegen unter denen von Pkw-Nutzern liegt. Die Tankaufenthalte müssen daher in die Touren- und Routenplanung integrierbar sein, ohne die Arbeitszeit und die Betriebskosten zu erhöhen. Für den Fernverkehr ergeben sich mit den Pkw-Tankstellen entlang der Autobahnen Synergien. Diese müssten für beide Fahrzeugkategorien zugänglich sein.

Allerdings weichen die Anforderungen an Tankstellen zur Betankung von Wasserstoff-Lkw von denen für Pkw ab. Lkw tanken pro Tankvorgang 10- bis 20-mal mehr als Pkw. Daher benötigen Lkw-Tankstellen eine höhere Kapazität, um pro Anlage möglichst viele Betankungsvorgänge durchführen zu können und so die Wirtschaftlichkeit der Tankstellen zu erhöhen. Für die technische Ausstattung bedeutet dies im Vergleich zu Pkw-Tankstellen, dass ein schnellerer Druckaufbau gewährleistet sein muss. Demzufolge ist die Dimensionierung der Kompressoren und Druckspeicher anzupassen. Die Energiedichte bei Wasserstoff erfordert eine Verdichtung auf 700 bar, um die Reichweite gegenüber der derzeit bei Bussen eingesetzten 350-bar-Druckspeichern zu erhöhen. Zudem lässt sich somit die Betankungsinfrastruktur zwischen Pkw und Lkw harmonisieren.

### 4.3.3 Zuverlässigkeit der BZ-Lkw

Im Gegensatz zu Pkw stellen Lkw Produktionsmittel dar. Dies bedeutet, dass jeder Ausfall eines Lkw entweder zu einem Umsatzverlust oder zu Mehrkosten durch Ersatzfahrten oder Maluszahlungen führt. Daher reagieren die Transportdienstleister deutlich sensibler auf eine gegenüber von konventionellen Antrieben geringere Zuverlässigkeit.

Ein steigender Anteil der Just-in-Time- und Just-in-Sequence-Anlieferungen führt zu wachsenden Anforderungen hinsichtlich der Verlässlichkeit an die Transportdienstleister. Um den Produktionsfluss nicht zu stören, steigen die Ansprüche des produzierenden Gewerbes hinsichtlich der Einhaltung von Anlieferfenstern. Verspätete oder ausgefallene Lieferungen führen bei enger Taktung der Produktion unmittelbar zu Bandstillständen und den damit verbundenen Produktionsausfallkosten. Daher werden zunehmend Maluszahlungen bei Unregelmäßigkeiten in der Lieferkette vertraglich vereinbart. Dies erhöht den Druck in der Transportbranche weiter. Das Vorhalten von Ersatzfahrzeugen im Falle eines Ausfalls der BZ-Lkw erhöht die Transportkosten und führt bei der derzeitigen Konkurrenzsituation in der Transportbranche zu Umsatzverlusten.

Da in Feldversuchen die Zuverlässigkeit von BZ-Bussen und -Pkw derzeit ähnlich bewertet wird, wie es auch bei Dieselfahrzeugen beobachtet werden kann (vgl. Wietschel et al.

2016b), besteht allerdings kein zusätzlicher Forschungsbedarf. Es ist daher davon auszugehen, dass Zuverlässigkeit der BZ-Antriebstechnologie zukünftig kein Markt-Diffusionshindernis darstellt.

Die bisher dargestellten Ausführungen zeigen, dass einige Synergien zwischen der Pkw-, Bus- und Lkw-Forschung bestehen. Darüber hinaus existieren jedoch auch spezielle Anforderungen an Lkw, die beim Design des BZ-Lkw zu berücksichtigen sind: Bedingt durch den hohen Anteil der Kraftstoffkosten beeinflussen Wirkungsgradverbesserungen bei der Brennstoffzellen die TCO stark und können Kostenvorteile gegenüber konventionellen Antrieben erzielen. Lkw tanken oftmals an anderen Orten wie Pkw, zudem liegt die Menge pro Tankvorgang deutlich höher. Neben der Verortung von Tankstellen muss daher auch die Kapazität der technischen Anlagen an die Anforderungen der Lkw angepasst werden. Die für das Transportgewerbe wichtige Zuverlässigkeit der BZ-Lkw erreicht bereits heute die Werte der konventionellen Fahrzeuge.

#### **4.4 Spezielle Anforderungen für große Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht über 12 Tonnen**

Als Teilmenge aller Lkw spielen die schweren Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 12 Tonnen bedingt durch die hohen Fahrleistungen (SZM bis 130.000 km/a) in Deutschland sowohl bei den Verkehrsbelastungen als auch bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen eine wichtige Rolle. Durch das hohe Gewicht und die hohen Jahresfahrleistungen grenzen sich die Anforderungen von schweren Lkw von den allgemeinen Anforderungen wie folgt ab: *Schwere Lkw fahren mehr als leichte Lkw, benötigen eine hohe Zuladungskapazität und mehr Motorleistung als leichte Lkw.*

##### **4.4.1 Mobile Speicherung von Wasserstoff**

Die Energiedichte von Wasserstoff liegt deutlich unter den Werten für Diesel und Erdgas (vgl. Abbildung 44). Um den Energiegehalt pro Volumen zu erhöhen, kann entweder der Druck erhöht werden, oder die Temperatur soweit abgesenkt werden, dass sich der Wasserstoff verflüssigt. Je nach Aggregatzustand und Speicherdruck liegt die Energiedichte dann zwischen 0,7 (300 bar, gasförmig, 20 °C) und 2,4 kWh pro Liter (flüssig). Der Energiegehalt pro Liter liegt bei Erdgas im Vergleich zu flüssigen Wasserstoff um etwa 50 % höher. Der Dieselmotorkraftstoff liefert bei gleichem Volumen etwa viermal soviel Energie.

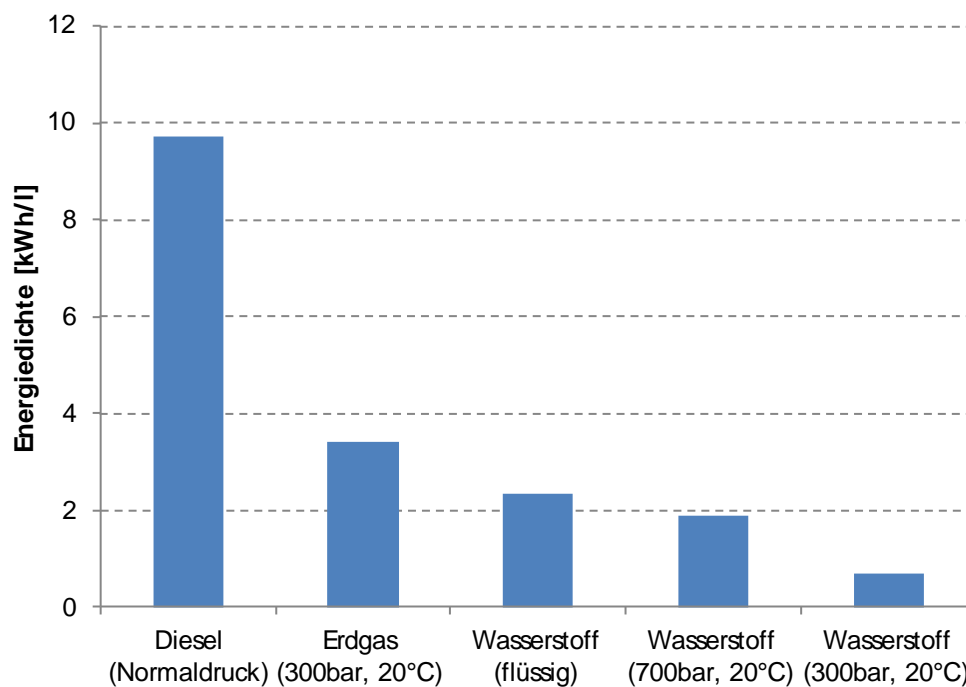


Abbildung 44: Energiedichten von Kraftstoffen im Vergleich (vgl. IWR 2005)

Die geringeren Energiedichten stellen die mobile Speicherung von Wasserstoff in Lkw mit hohen Fahrleistungen und hohem Gesamtgewicht vor Herausforderungen. Die Tanksysteme nehmen bei gleichem Speicherinhalt etwa fünfmal mehr Volumen in Anspruch. Zudem erfordert die Speicherung unter Druck bzw. die Kühlung von flüssigem Wasserstoff dickwandige Drucktanks, deren Gewicht bei gleicher Reichweite etwa beim Drei- bis Vierfachen über dem der Speicher für Dieselkraftstoff liegt (vgl. Auto-Presse 2011, hycar 2016 und EvoBus GmbH 2009). Beim Aggregatzustand des Wasserstoffs ist neben dem Energiegehalt auch die Anforderung an die Tankinfrastruktur zu berücksichtigen. Sollen bestehende Tankstellen benutzt werden und die Möglichkeit zur Nutzung von Pkw-Tankstellen für Lkw gegeben sein, so empfiehlt es sich, auch bei BZ-Lkw den Wasserstoff gasförmig mit einem Druck von 700 bar zu speichern.

Das größere Volumen der Tanksysteme verhindert ein einfaches Austauschen des Diesel- durch Wasserstofftanks. Zudem werden Wasserstofftanks derzeit als zylindrische Flaschen, die parallel geschaltet sind, realisiert. Dies hat zur Folge, dass sich der freiwerdende Bauraum nicht optimal ausnutzen lässt. Im Gegensatz zu leichten Lkw, deren großen Achsabstände Volumenreserven für den Einbau von Wasserstofftanks aufweisen, schränken die engen Achsabstände bei Sattelzugmaschinen den Bauraum für Tanksysteme erheblich ein (vgl. Abbildung 45). Zusätzlich zum beschränkten Bauraum ergeben sich durch die maximal zulässigen Achslasten Restriktionen.

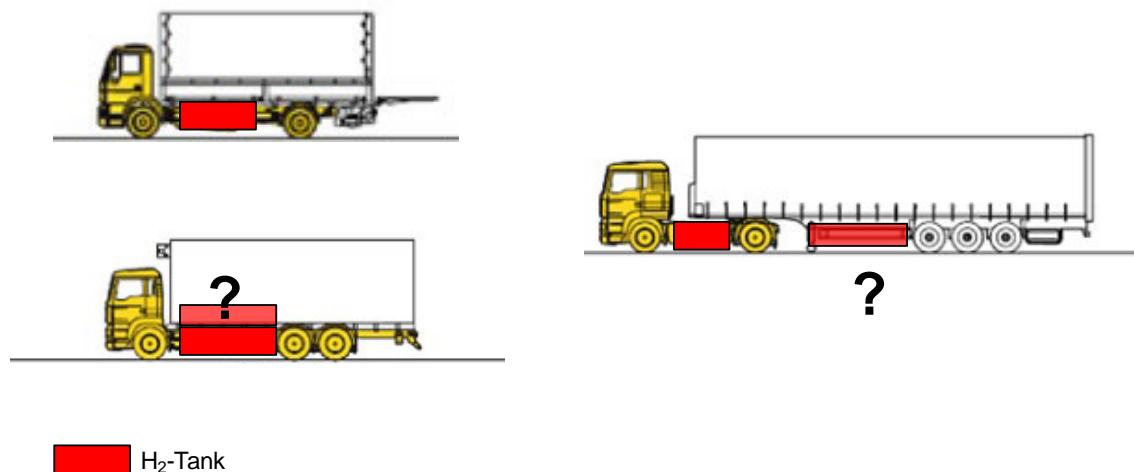


Abbildung 45: Mögliche Positionierung des H<sub>2</sub>-Tanks (Bildquelle: Hoepke und Breuer 2013)

Unter den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen kann eine ausreichende Reichweite der BZ-Lkw nur gewährleistet werden, wenn erweiterte Tanksysteme in den Sattelanhänger installiert werden. Dies schränkt die Einsatzflexibilität (z. B. Tausch von Sattelanhängern) jedoch erheblich ein. Inwieweit die Richtlinie (EU) 2015/719 durch eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes um eine Tonne den Einbau von Wasserstofftanks begünstigen kann, bleibt abzuwarten. Zusätzlich dazu erlaubt die Richtlinie eine Verlängerung der Fahrzeuge um maximal 500 mm für den Anbau von Elementen zur Verbesserung der Aerodynamik. Inwiefern diese zusätzliche Baulänge für die Tanksysteme alternativer Antriebe verwendet werden darf (z. B. Installieren des Wasserstofftanks direkt hinter dem Fahrerhaus), bleibt zu klären.

#### 4.4.2 Motorleistung bei großen Lkw

Die Motoren bei Lkw sind aufgrund des höheren Gewichts größer dimensioniert als bei Pkw. Während Pkw-Motoren in der Mittelklasse etwa 100 bis 150 kW Leistung erreichen, werden die meisten Sattelzugmaschinen mit Motorleistungen zwischen 300 und 350 kW verkauft (vgl. KBA 2014a). Bisherige Brennstoffzellen-Anwendungen erreichen Systemleistungen von etwa 150 kW (vgl. EvosBus GmbH 2009). Abbildung 46 stellt die tatsächlich benötigte Leistung eines Sattelzuges zur konstanten Fahrt bei 50, 70 und 85 km/h dar. Dabei wird eine permanente Leistung von etwa 100 kW zur Überbrückung des Roll- und Luftwiderstandes benötigt. Die darüber hinaus verfügbare Leistung dient als Überschussleistung zum Beschleunigen und für die Steigfähigkeit an Steigungen. Des Weiteren verfügen einige Lkw und Auflieger für den Transport bestimmter Güter über Nebaggregate (z. B. Kühlmaschinen, Kompressoren), die zusätzliche Leistung und Energieverbrauch darstellen. So verbraucht beispielsweise ein Kühlaggregat gegenwärtig rund 2 bis 3 Liter Diesel je Betriebsstunde (vgl. Transport 2015). Die Aufstellung legt nahe, dass ein BZ-System bereits mit 150 bis 200 kW ausreichend ausgestattet wäre und sich die even-

tuelle darüber hinaus benötigte Überschussleistung durch Hybridlösungen realisieren lassen.

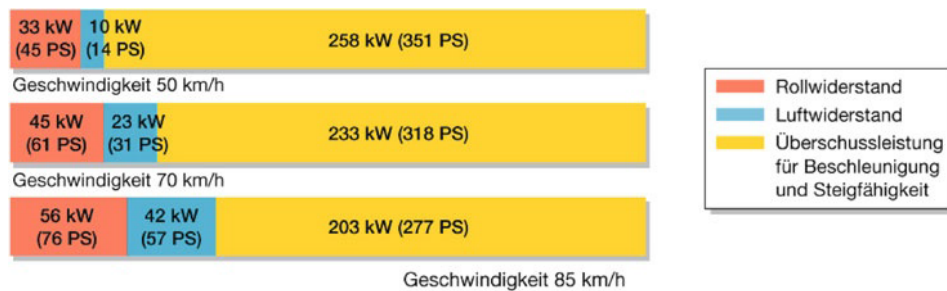


Abbildung 46: Benötigte Leistung von Sattelzügen (vgl. Hoepke und Breuer 2013, S. 58)

Wenngleich nach jetzigem Stand der Forschung keine 300 bis 350 kW starken BZ-Systeme entwickelt werden müssen (vgl. Wietschel et al. 2016b), so reichen die bisherigen Anwendungen bis 150 kW nicht aus. Zur Erhöhung der Leistung der Antriebssysteme auf Basis der BZ für Pkw und Busse lassen sich die Stacks der Brennstoffzelle modular erweitern. Dies erlaubt die direkte Realisierung von Skaleneffekten mit der Pkw-Brennstoffzellenproduktion. Allerdings besteht derzeit noch Forschungsbedarf bei der Skalierung der Nebenaggregate und -komponenten. Eine Realisierung der Skaleneffekte über alle Bauteile hinweg könnte zu erheblichen Kostensenkungen bei der BZ-Produktion bei alle Fahrzeugkategorien führen.

Die Überschussleistung über 200 kW kann durch eine Hybridisierung (z. B. mit einer Batterie) erreicht werden. Damit lassen sich kurzfristige Beschleunigungen bei Überholvorgängen und zeitlich begrenzte Steigungsfahrten realisieren, ohne das BZ-Antriebssystem zu überdimensionieren. Teilweise sind solche Hybridlösungen bei Stadtbussen bereits realisiert. Daher gilt bei der Skalierung von BZ ebenso wie bei der Hybridisierung: Je höher die Synergie mit der BZ-Produktion für Pkw und Busse ausfällt, desto geringer werden die Kosten für die BZ-Lkw-Produktion ausfallen und desto günstiger können die Fahrzeuge den Endnutzern angeboten werden.

#### 4.4.3 Reale Anforderungen an BZ-Lkw

Die bisherigen Ausführungen beschränkten sich auf die objektiven technischen Anforderungen an BZ-Lkw. Für den Markterfolg ist aber in erster Linie die Akzeptanz der Nutzer erforderlich. Je größer diese Akzeptanz, desto eher sind die Nutzer bereit, einen Mehrpreis gegenüber konventionellen Antriebssystemen für alternative Technologie zu bezahlen. Die Diskussion zur Marktakzeptanz wird im Folgenden im Hinblick auf die maximale Motorleistung, die Tankgröße und die damit verbundenen Reichweite sowie die Tankstelleninfrastruktur geführt.

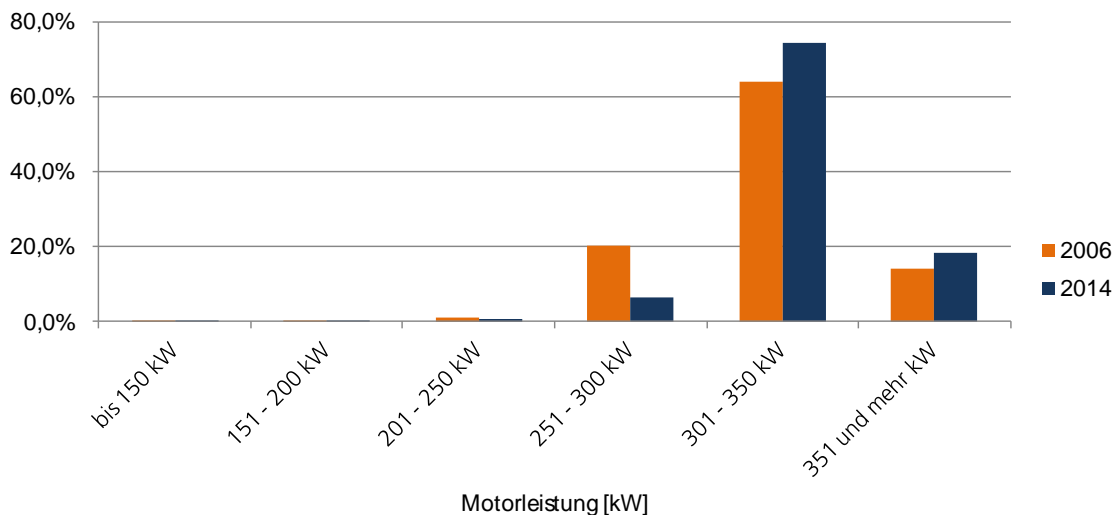


Abbildung 47: Anteile der Neuzulassungen von Sattelzugmaschinen nach Motorleistung (KBA 2006, KBA 2014a)

Trotz der in Abbildung 46 dargestellten verfügbaren Überschussleistung nahm die maximale Leistung von Sattelzugmaschinen zwischen den Jahren 2006 und 2014 deutlich zu (vgl. Abbildung 47). Damit sind die derzeit am Markt verfügbaren Fahrzeuge deutlich übermotorisiert. Aus Sicht der Brennstoffzellenforschung gilt es daher zu untersuchen, welche minimale Motorleistung das Antriebssystem aufweisen muss, um mit den derzeitigen Marktanforderungen der Nutzer konkurrieren zu können. Entscheidend ist dabei nicht, ob die Dimensionierung mit 200 kW permanenter Systemleistung aus objektiver Sicht ausreichend ist, sondern vielmehr ob diese Motorleistung von den Nutzern als ausreichende Dimensionierung wahrgenommen wird. Dazu können Nutzerbefragungen unter anderem zur Häufigkeit des Abrufs der in Abbildung 46 dargestellten Überschussleistung wichtige Impulse liefern.

Neben der Dimensionierung des Antriebssystems führen bei alternativen Antrieben die verminderten Reichweiten zu einer geringeren Nutzerakzeptanz. Wie bereits in Kapitel 4.4.1 dargestellt, lassen sich aufgrund der geringen Energiedichte des Wasserstoffs die Reichweiten der konventionellen Diesel-Lkw von etwa 3.000 km (vgl. Daimler 2016) nicht nachbilden. Unter Berücksichtigung verlängerter Sattelzugmaschinen zum Einbau der Tanksysteme lassen sich mit 700 bar Wasserstoffdrucktanks Reichweiten bis maximal 1.000 km erreichen (vgl. Wietschel et al. 2016b). Unter Berücksichtigung der Lenk- und Ruhezeiten innerhalb der EU ermöglicht diese Reichweite eine eintägige Fahrt ohne Tankstopp (etwa 10 bis 12 Stunden). Es ist daher zu klären, ob dies für die Speditionsdienstleister ein akzeptabler Aktionsradius des Lkw darstellt.

Eng verknüpft mit der Tankgröße und der damit verbundenen Reichweite sind der Aufbau und die Dichte der Tankstelleninfrastruktur. Aus den vorangegangenen Ausführungen ergibt sich, dass auch für Lkw aus Gründen der Energiedichte und der Kompatibilität mit

den Tankanlagen für Brennstoffzellen-Pkw 700 bar Drucktanks favorisiert werden sollten. Somit ließen sich bestehende und zukünftige Pkw-Tankstellen an Autobahnen durch geeignete Dimensionierung der Kompressoren und Drucktanks auch für Lkw nutzbar machen lassen. Es ist jedoch anzunehmen, dass Tankstellen an Autobahnen und in Wohngebieten (für Pkw) nicht ausreichend sein werden. Daher sind die Anforderungen der Lkw-Nutzer näher zu spezifizieren. Dazu zählen das Erfragen der Umwegetoleranz und die Identifikation von favorisierten Lagen für Tankstellen. Kleinanlagen auf Betriebsgeländen der Speditionen, wie bisher bei Dieseltankstellen durchaus üblich, scheinen für Wasserstoff kostenintensiver in der Anschaffung und im Unterhalt zu sein. Daher wäre zu prüfen, ob die Speditionen bereit wären, diese Mehrkosten zu tragen, oder ob dezentrale Anlagen für die Speditionen heutzutage eher historisch gewachsen sind und nicht unbedingt erhalten bleiben müssen. Wichtig aus Sicht der Nutzer ist – gerade bei geringem Ausbauzustand des Tankstellennetzes – frühzeitig über die technische Verfügbarkeit informiert zu werden. Beim Ausbau des Tankstellennetzes ist immer die Entwicklung der Tanktechnologien und die daraus abgeleiteten Reichweiten zu berücksichtigen.

### **Fazit zur Marktakzeptanz**

Ziel der Forschung zur Marktakzeptanz ist es, die marktgerechten Anforderungen an die BZ-Lkw zu identifizieren, um damit Produkte am Markt anbieten zu können, deren Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Kunden optimal ist und damit eine hohe Attraktivität am Markt erreichen. Dazu müssen einige Spezifikationen eng mit den Anforderungen des Kunden abgestimmt werden. Dazu zählen die Tankgröße und die sich daraus abzuleitende Reichweite, die optimalen Tankstellenstandorte sowie die maximal notwendige Dimensionierung des Antriebsstranges. Da derzeit kaum Befragungen von Lkw-Nutzern vorliegen, müssen diese minimalen Marktanforderungen durch Akzeptanzforschung eruiert werden und in ein Lastenheft für BZ-Lkw aufgenommen werden.

## 4.5 FuE-Bedarf für BZ-Lkw

Auf Basis der Ausführungen in den Kapiteln 4.1 bis 4.4 ergeben sich **neun zentrale Thesen** für den Forschungsbedarf bei BZ-Lkw. Diese gliedern sich grob in drei Blöcke: Zunächst ergeben sich zwei Thesen als Fazit aus dem Marktumfeld und der Pkw- und Bus-Forschung, aus den speziellen Anforderungen für Lkw allgemein lassen sich zwei weitere Thesen ableiten. Für schwere Lkw über einem zulässigen Gesamtgewicht von 12 t ergibt sich ein spezieller Forschungsbedarf, der sich in den letzten vier Thesen wiederfindet. Abschließend wird empfohlen, Demonstrationsprojekte für BZ-Lkw und den dazugehörigen Tankinfrastrukturen zu forcieren, da bisher kaum Erprobungen in diesem Feld durchgeführt wurden.

### 1. Konkurrenztechnologien angemessen berücksichtigen

Besonders im mittleren Bereich der Jahresfahrleistungen zwischen 40.000 und 80.000 km weichen die TCO-Werte aller Antriebstechnologien nur gering voneinander ab. Selbst geringe technologische Fortschritte können daher die Marktdiffusion stark beeinflussen. Hersteller von BZ-Lkw müssen sich im Verteilerverkehr besonders mit den Entwicklungen der Konkurrenztechnologien BEV und CNG-Lkw auseinandersetzen. Im Fernverkehr besteht erhebliche Konkurrenz durch Hybrid-Oberleitungs-Lkw und CNG/LNG-Lkw. Die Betriebskosten der Technologien hängen allerdings in nicht unerheblichem Maße von der zukünftigen Besteuerung der Kraftstoffe ab (z. B. CNG/LNG, Wasserstoff). Weitere gesetzliche Rahmenbedingungen (z. B. Einfahrverbote, Änderung der zulässigen Maße und Gewichte) können die Diffusion von BZ-Lkw bremsen oder beschleunigen.

### 2. Spillover-Effekte aus dem BZ-Pkw und Bus nutzen, aber nicht überschätzen

Durch die Forschung bei Brennstoffzellen-Anwendungen in Pkw und Bussen lassen sich einige Spillover-Effekte für Lkw ableiten. Besonders die Fortschritte bei Kaltstartfähigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit der BZ-Systeme können auch für Lkw nützlich sein. Bei der Produktion von Brennstoffzellenstacks können durch gleichzeitige Verwendung der BZ in Lkw Skaleneffekte entstehen, die sowohl bei Pkw als auch die Lkw produktionskostensenkend wirken können. Darüberhinaus existieren für Lkw allerdings teilweise stark abweichende Anforderungen (z. B. Tankvolumen, Tankstellen).

FuE-Bedarf für BZ-Lkw allgemein:

### 3. Verbesserung des Wirkungsgrades zur Senkung der Kraftstoffkosten

Der Anteil der Kraftstoffkosten ist bei Lkw bedingt durch die hohen Fahrleistungen deutlich höher als bei Pkw. Effizienzsteigerungen bei der BZ wirken daher deutlich stärker auf die TCO. Besonders bei Langstrecken Lkw im Fernverkehr können hohe Wirkungsgrade einen TCO-Vorteil der BZ-Lkw schaffen. Da derzeitige BZ-Systeme etwa Wirkungsgrade um die 60 % erreichen, ist zukünftig vermehrt zu untersuchen, wie und ob sich diese System-Wirkungsgrade weiter steigern lassen. Hierbei ist stets auf die Möglichkeit der Amortisation der zusätzlichen Investition zu achten.



#### **4. Anforderungen des Lkw beim Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur berücksichtigen**

Lkw tanken nicht an denselben Orten wie Pkw oder Busse: Zwar können Tankstellen entlang von Autobahnen und großen Bundesstraßen durchaus für beide Fahrzeugkategorien von Interesse sein, in Industriegebieten oder in Stadtrandlage müssen aber aller Voraussicht nach auch Tankstellen vorwiegend für die Lkw-Nutzung geschaffen werden. Die Tankstelleninfrastruktur muss dabei die Umwege für die Transportdienstleister minimieren. Konzepte für dezentrale H<sub>2</sub>-Tankstellen auf Betriebsgeländen sind zu untersuchen.

FuE-Bedarf für BZ-Lkw über 12 t zGG:

#### **5. Energiegehalt des Wasserstofftanks erhöhen**

Die Energiedichte von Wasserstoff ist deutlich geringer als die des Diesels. Um ähnliche Reichweiten bei geringen Nutzlast-Nutzvolumen-Einbußen zu erreichen, müssen bei Lkw über 12 t zGG die zulässigen Maße (Gewicht und Länge) der Lkw angepasst, der Bauraum für die Tanksysteme optimiert oder alternative Speichertechnologien untersucht werden (Flüssig-H<sub>2</sub>, Hydrid-Speicherungen).

#### **6. Akzeptanz von veränderten Reichweiten, Tankinfrastrukturen und Motorleistungen untersuchen**

Um konkurrenzfähige Produkte am Markt zu positionieren, müssen zunächst die minimalen Marktanforderungen an die Antriebstechnologie identifiziert werden. Dazu zählen Befragungen der Transportdienstleister, um optimierte Tankstellenstandorte zu ermitteln, welche akzeptable Umwege aufweisen. Des Weiteren sind minimale Reichweiten zu ermitteln, die von den Transportdienstleister im Alltag als praktikabel angesehen werden. So können die Tanksysteme optimal ausgelegt werden. Wenige Informationen existieren zudem über eine optimale Dimensionierung des Antriebsystems, da die abgerufene Leistung oft nur ein Drittel der installierten Leistung beträgt. Umfangreiche Befragungen zu den Gewohnheiten und Anforderungen der Transportdienstleister können daher helfen, marktgerechte Lösungen anbieten zu können, die technologisch umsetzbar sind und attraktive Marktpreise aufweisen.

#### **7. BZ mit hohen Leistungen bzw. Hybridsysteme**

Lkw benötigen höhere Leistungen als Pkw. Zur Erbringung der permanenten Leistung können bestehende BZ-Systeme hochskaliert werden. Leistungsspitzen für Beschleunigung, Steigungsfahrten und Nebenaggregate sollten mittels Hybrid-Technologien (z. B. mit Batterien) zur Verfügung gestellt werden. Forschungsbedarf besteht einerseits in der Dimensionierung solcher Hybridsysteme, andererseits ist sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Umsetzbarkeit zu untersuchen.

#### **8. Skalierbarkeit von Brennstoffzellensystemen**

Derzeitige BZ-Anwendungen enden bei einer Leistung von etwa 150 kW. Die Produktionskosten könnten bei der Möglichkeit einer Skalierbarkeit der Pkw-BZ auf Leistungsstufen um die 200 kW von den Skaleneffekten aus der Pkw-Produktion

profitieren. Besonderer Forschungsbedarf besteht dabei bei der Skalierung von Nebenkomponenten wie Steuerung, Kühlung etc.

### **9. Demonstrationsprojekte**

Da bisher sowohl in Deutschland als auch weltweit kaum Demonstrationsprojekte von BZ-Lkw initiiert wurden, wäre dies ein erster Schritt zur Validierung der oben genannten FuE-Bedarfe in der Praxisanwendung. Dabei sind sowohl Transportdienstleister als auch die Infrastrukturbetreiber intensiv einzubinden. Ebenfalls wäre eine sozialwissenschaftliche Begleitforschung ratsam, um die Marktakzeptanz zu überprüfen.

Sämtliche der genannten FuE-Bedarfe wurde in einem Expertenworkshop diskutiert und bestätigt. Bei der Priorisierung der neun Thesen wurde keine klar favorisiert. Alle der genannten Aussagen scheinen daher sowohl kurz- als auch mittelfristig für den Markterfolg des BZ-Erfolg bedeutsam zu sein.

## 5 Anhang

### 5.1 Anhang – Interviewte Expertinnen und Experten

Es wurden folgende Expertinnen und Experten in den USA und Deutschland interviewt:

- Marijke Bekken und Earl Landberg vom California Air Resources Board (CARB), Teil der California Environmental Protection Agency (CEPA) und damit einer Organisation, die direkt dem Gouverneur des US-Bundesstaates Kalifornien berichtet (CARB 2012),
- Nico Bouwkamp von der California Fuel Cell Partnership (CAFCP), einer Plattform zur Zusammenarbeit verschiedener Organisationen wie Automobilherstellern, Energieversorgern, Regierungsbehörden und Unternehmen rund um die Brennstoffzellentechnologie, die sich der Förderung der Kommerzialisierung von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeugen verschrieben haben (CAFCP 2016),
- Thorsten Herbert, Bereichsleiter Verkehr und Infrastruktur der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (NOW), die verantwortlich für die Koordination und Steuerung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) und des Programms Modellregionen Elektromobilität des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ist (NOW 2016),
- Dr. Manfred Schuckert, Automotive Regulatory Strategy Commercial Vehicles der Daimler AG und weltweit anerkannter Experte für Antriebssysteme im Automobilsektor (CWC 2016).

Darüber hinaus wurden folgende Personen in den Ländern China und Japan bzgl. der dortigen Aktivitäten in Industrie und Politik konsultiert:

- Masataka Kadowaki, Chief Officer des New Energy Technology Department, Fuel Cell and Hydrogen Technology Group der New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) in Japan,
- Hoshino Masashi, Deputy Director des Hydrogen and Fuel Cell Promotion Office, New and Renewable Energy Division, Agency for Natural Resources and Energy des Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) in Japan,
- Hideya Miki, Representative im Fraunhofer Representative Office in Japan,
- Prof. Pan Mu, National 863 High Technology Research and Development Program (HTRDP) Advisor, Committee Member for the Field of Advanced Energy Technologies und Professor am Institute of New Materials der Wuhan University of Technology (WHUT)/China,
- Boris Zhang, Department Head des Policy & Regulation Research Department im China Automotive Technology & Research Center (CATARC) in China.

## 5.2 Verwendete Parameter

Die Parameter für die Markthochlaufberechnung sind der MKS Teilstudie „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“ (Wietschel et al. 2017) detailliert erläutert und werden hier nur in Tabellen dargestellt. Für eine detaillierte Diskussion der Eingangsgrößen sei auf diesen Bericht verwiesen.

Tabelle 10: Parameter für Dieselfahrzeuge 2015

Dieselfahrzeuge 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	30.000	(2)	40.000	(2)	50.000	(2)	65.000	(2)	102.000	(2)
Tankgröße	l	75	(3)	120	(3)	120	(3)	570	(3)	570	(3)
Verbrauch	kWh/km	0,74	(4)	1,32	(4)	1,82	(4)	2,39	(4)	3,11	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,0914	(5)	0,1718	(5)	0,1643	(5)	0,1565	(5)	0,1427	(5)
Kosten AdBlue	€/l	0,6	(6)	0,6	(6)	0,6	(6)	0,6	(6)	0,6	(6)
Kosten AdBlue / km	€/km	0,001	(7)	0,002	(7)	0,003	(7)	0,004	(7)	0,006	(7)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Hülsmann et al. 2014, (3) Daimler AG 2016a, (4) Handbook Emission Factors for Road Transport 3.2 (HBEFA), (5) Lastauto Omnibus Katalog 2014, (6) inforoad GmbH, (7) inforoad GmbH, Dünnebeil et al. 2015

Tabelle 11: Parameter für Dieselfahrzeuge 2030

Dieselfahrzeuge 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	37.470	(2)	49.960	(2)	62.450	(2)	81.998	(2)	128.673	(2)
Tankgröße	l	75	(3)	120	(3)	120	(3)	570	(3)	570	(3)
Verbrauch	kWh/km	0,61	(4)	1,09	(4)	1,50	(4)	1,89	(4)	2,46	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,0914	(5)	0,1718	(5)	0,1643	(5)	0,1565	(5)	0,1427	(5)
Kosten AdBlue	€/l	0,6	(6)	0,6	(6)	0,6	(6)	0,6	(6)	0,6	(6)
Kosten AdBlue / km	€/km	0,002	(7)	0,004	(7)	0,005	(7)	0,007	(7)	0,009	(7)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Kreyenberg et al. 2015, (3) Daimler AG 2016a, (4) Dünnebeil et al. 2015, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2014, (6) inforoad GmbH, (7) inforoad GmbH, Dünnebeil et al. 2015

Tabelle 12: Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2015

FCEV 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	157.300	(2)	203.718	(2)	248.307	(2)	318.089	(2)	696.070	(2)
Tankgröße	kWh	182,08	(3)	326,47	(3)	598,41	(3)	804,41	(3)	1046,58	(3)
Verbrauch	kWh/km	0,61	(4)	1,09	(4)	1,50	(4)	2,01	(4)	2,62	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,239	(5)	0,291	(5)	0,370	(5)	0,503	(5)	0,704	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Hülsmann et al. 2014, (3) eigene Annahmen, (4) Hülsmann et al. 2014, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012, Hülsmann et al. 2014

Tabelle 13: Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2030

FCEV 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	54.050	(2)	70.000	(2)	94.500	(2)	121.057	(2)	174.000	(2)
Tankgröße	kWh	156,59	(3)	280,77	(3)	514,63	(3)	691,79	(3)	900,06	(3)
Verbrauch	kWh/km	0,52	(4)	0,94	(4)	1,29	(4)	1,73	(4)	2,25	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,054	(5)	0,083	(5)	0,102	(5)	0,118	(5)	0,137	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Hülsmann et al. 2014, (3) eigene Annahmen, (4) Hülsmann et al. 2014, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012, Hülsmann et al. 2014

Tabelle 14: Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2015

CNG / LNG 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	33.500	(2)	61.538	(3)	76.923	(3)	100.000	(3)	137.000	(3)
Tankgröße	kg										
Verbrauch	kWh/km	0,82	(4)	1,46	(4)	2,01	(4)	2,66	(4)	3,46	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,1064	(5)	0,1998	(5)	0,1890	(5)	0,1799	(5)	0,1647	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Hülsmann et al. 2014, (3) Hülsmann et al. 2014, erdgas mobil GmbH 2015, (4) Hülsmann et al. 2014, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2014, Propfe et al. 2012

Tabelle 15: Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2030

CNG / LNG 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	42.311	(2)	77.723	(2)	97.154	(2)	143.000	(2)	195.910	(2)
Tankgröße	kg										
Verbrauch	kWh/km	0,60	(2)	1,07	(2)	1,47	(2)	2,14	(2)	2,78	(2)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,0914	(3)	0,1718	(3)	0,1643	(3)	0,1565	(3)	0,1427	(3)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Kreyenberg et al. 2015, (3) Lastauto Omnibus Katalog 2014, Propfe et al. 2012

Tabelle 16: Parameter für BEV-Fahrzeuge 2015

BEV 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	72.534	(2)	109.439	(2)	141.982	(2)	184.617	(2)	250.704	(2)
Tankgröße	kWh	60	(3)	110	(3)	150	(3)	190	(3)	240	(3)
Verbrauch	kWh/km	0,35	(4)	0,63	(4)	0,88	(4)	1,09	(4)	1,4	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,091	(5)	0,168	(5)	0,221	(5)	0,256	(5)	0,306	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, (3) Hülsmann et al. 2014, (4) Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012

Tabelle 17: Parameter für BEV-Fahrzeuge 2030

BEV 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	56.141	(2)	78.211	(2)	99.066	(2)	130.176	(2)	185.177	(2)
Tankgröße	kWh	60	(3)	110	(3)	150	(3)	190	(3)	240	(3)
Verbrauch	kWh/km	0,308	(4)	0,5544	(4)	0,7744	(4)	0,9592	(4)	1,232	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,046	(5)	0,087	(5)	0,108	(5)	0,117	(5)	0,126	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, (3) Hülsmann et al. 2014, (4) Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012

Tabelle 18: Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2015

PHEV 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	62.354	(2)	89.079	(2)	116.532	(2)	154.077	(2)	209.984	(2)
Tankgröße konventionell	l	75	(3)	120	(3)	120	(3)	570	(3)	570	(3)
Tankgröße elektrisch	kWh	40	(4)	70	(4)	100	(4)	130	(4)	160	(4)
Verbrauch konventionell	kWh/km	0,68	(5)	1,21	(5)	1,68	(5)	2,22	(5)	3,06	(5)
Verbrauch elektrisch	kWh/km	0,35	(5)	0,63	(5)	0,88	(5)	1,09	(5)	1,40	(5)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,143	(6)	0,266	(6)	0,308	(6)	0,339	(6)	0,382	(6)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, (3) eigene Annahmen, (4) Hülsmann et al. 2014, (5) Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, (6) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012

Tabelle 19: Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2030

PHEV 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	0 – 3,5 t	(1)	3,51 – 7,5 t	(1)	7,51 – 12 t	(1)	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	44.981	(2)	57.751	(2)	71.166	(2)	94.836	(2)	140.537	(2)
Tankgröße konventionell	l	75	(3)	120	(3)	120	(3)	570	(3)	570	(3)
Tankgröße elektrisch	kWh	50	(4)	80	(4)	110	(4)	140	(4)	180	(4)
Verbrauch konventionell	kWh/km	0,58	(5)	1,04	(5)	1,44	(5)	2,02	(5)	2,65	(5)
Verbrauch elektrisch	kWh/km	0,31	(5)	0,55	(5)	0,77	(5)	0,96	(5)	1,23	(5)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,101	(6)	0,190	(6)	0,201	(6)	0,207	(6)	0,214	(6)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Hülsmann et al. 2014, Thielmann et al. 2015, (3) eigene Annahme, (4) eigene Annahme, (5) Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, (6) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012

Tabelle 20: Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2015

Diesel-Hybrid 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	117.892	(2)	185.000	(2)
Tankgröße elektrisch	kWh	0	(3)	0	(3)
Verbrauch	kWh/km	1,38	(4)	1,80	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,151	(5)	0,135	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Wietschel et al. 2016a, (3) eigene Annahmen, (4) Wietschel et al. 2016a, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012

Tabelle 21: Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2030

Diesel-Hybrid 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	96.863	(2)	152.000	(2)
Tankgröße elektrisch	kWh	0	(3)	0	(3)
Verbrauch	kWh/km	1,23	(4)	1,60	(5)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,151	(6)	0,135	(6)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Wietschel et al. 2016a, (3) eigene Annahmen, (4) Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, (5) Lastauto Omnibus 2013, Kreyenberg et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, (6) Lastauto Omnibus 2014, Propfe et al. 2012

Tabelle 22: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2015

Batterie-Hybrid 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	196.136	(2)	286.800	(2)
Tankgröße elektrisch	kWh	154	(3)	200	(3)
Verbrauch	kWh/km	1,38	(4)	1,80	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,312	(5)	0,380	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a (3) eigene Annahmen, (4) Wietschel et al. 2016a, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015

Tabelle 23: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2030

Batterie-Hybrid 2030		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	> 12 t	(1)	SZM	(1)
Investitionen	€	125.455	(2)	189.200	(2)
Tankgröße elektrisch	kWh	154	(3)	200	(3)
Verbrauch	kWh/km	1,23	(4)	1,60	(5)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,102	(6)	0,107	(6)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, (3) eigene Annahmen, (4) Hülsmann et al. 2014, Hacker et al. 2014, Hacker et al 2015, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Kreyenberg et al. 2015, (6) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015

Tabelle 24: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2015

Batterie-Hybrid 2015		Gewichts- klasse	Q	Gewichts- klasse	Q
Attribut	Einheit	SZM Stromschiene	(1)	SZM induktiv	(1)
Investitionen	€	303.800	(2)	311.800	(2)
Tankgröße elektrisch	kWh	200	(3)	200	(3)
Verbrauch	kWh/km	1,80	(4)	2,50	(4)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,380	(5)	0,512	(5)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, (3) eigene Annahmen, (4) Wietschel et al. 2016a, (5) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015



Tabelle 25: Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2030

Batterie-Hybrid 2030	Attribut	Einheit	Gewichts- klasse		
			SZM Stromschiene	SZM induktiv	
			Q	Q	Q
			(1)	(1)	(1)
Investitionen	€	202.200	(2)	187.600	(2)
Tankgröße elektrisch	kWh	200	(3)	200	(3)
Verbrauch	kWh/km	1,60	(4)	1,90	(5)
Wartung & Instandhaltung	€/km	0,107	(6)	0,120	(6)

(1) Lenz et al. 2010, (2) Thielmann et al. 2015, Wietschel et al. 2016a, (3) eigene Annahmen, (4) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Kreyenberg et al. 2015, (5) Wietschel et al. 2016a, (6) Lastauto Omnibus Katalog 2013, Propfe et al. 2012, Thielmann et al. 2015



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutschland – Stand und Prognose (Quelle UBA (2013), BAU-Szenario) .....	7
Abbildung 2:	Weltweite Publikationen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen) .....	13
Abbildung 3:	Weltweite Publikationen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen, standardisiert auf das Jahr 2000 (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen).....	13
Abbildung 4:	Publikationsanteile Brennstoffzellen-Fahrzeuge bezogen auf Fahrzeuge gesamt (nach Automotive und Nutzfahrzeugen/NZF), Anteile in Prozent (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen) .....	14
Abbildung 5:	Publikationen aus ausgewählten Ländern im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen, 2005-2014 (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen).....	14
Abbildung 6:	Publikationsanteile ausgewählter Länder im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen in Prozent, 2005-2014 (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen).....	15
Abbildung 7:	Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen).....	16
Abbildung 8:	Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen normiert auf das Jahr 2000 (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen).....	17
Abbildung 9:	Patentanteile von BZ-Fahrzeugen bezogen auf Fahrzeuge insgesamt (nach Automotive und Nutzfahrzeugen), Anteile in Prozent (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen).....	17
Abbildung 10:	Patentanmeldungen ausgewählter Länder im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen, 2004-2013 (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen) .....	18
Abbildung 11:	Patentanteile ausgewählter Länder im Bereich Fahrzeuge und Brennstoffzellen in Prozent, 2004-2013 (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen).....	19
Abbildung 12:	Publikationen ausgewählter Länder zu Brennstoffzellen für Lkw und Busse (Quellen: Elsevier 2016, eigene Erhebungen) .....	20
Abbildung 13:	Transnationale Patentanmeldungen ausgewählter Länder zu Brennstoffzellen für Lkw und Busse (Quellen: DWPI 2016, eigene Erhebungen).....	21
Abbildung 14:	RLA (für Publikationen) zu BZ-Lkw (Quelle: eigene Erhebungen) .....	23
Abbildung 15:	RPA (für Patente) zu BZ-Lkw (Quelle: eigene Erhebungen) .....	23
Abbildung 16:	RLA (für Publikationen) zu BZ-Bussen (Quelle: eigene Erhebungen).....	24
Abbildung 17:	RPA (für Patente) zu BZ-Bussen (Quelle: Eigene Erhebungen) .....	24
Abbildung 18:	Erste Seite des für die Experteninterviews eingesetzten Fragebogens mit der im Projekt entwickelten Technologietabelle .....	26
Abbildung 19:	Zweite Seite des für die Experteninterviews eingesetzten Fragebogens .....	27
Abbildung 20:	Amerikanische Klassifizierung von Lkw nach zulässigem Gesamtgewicht und beispielhaften Anwendungen (CTA 2014) .....	29
Abbildung 21:	Übersicht über die politische Verankerung des Themas der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie unter dem METI in Japan (IPHE 2016) .....	39

Abbildung 22: Zusammenfassung der strategischen Roadmap für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Graph 4 für Brennstoffzellen-Fahrzeuge und Wasserstoffspeicherung in Tanks) (METI 2014).....	40
Abbildung 23: Abbildung eines BZ-Lkw mit Einsatzbereich Hafen in einem US-amerikanischen Demonstrationsprojekt (CTE 2016) .....	43
Abbildung 24: Die Toyota-Roadmap zu den Antriebstechnologien der Zukunft: „für jeden Einsatzzweck die geeignete Antriebsart“ (Toyota 2014).....	45
Abbildung 25: Prognose für kumulierte Kosten einer Wasserstoffinfrastruktur (IEA 2014) .....	48
Abbildung 26: Anforderungen an das Modell .....	51
Abbildung 27: Übersicht zur Vorgehensweise im Modell .....	52
Abbildung 28: Anteil verschiedener Marken an den Neuzulassungen von SZM .....	54
Abbildung 29: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 1 (bis 3,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse) .....	61
Abbildung 30: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 2 (3,5 t bis 7,5 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse) .....	62
Abbildung 31: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 3 (7,5 t bis 12 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse) .....	63
Abbildung 32: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Größenklasse 4 (12 t bis 26 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse) .....	63
Abbildung 33: Neuzulassungen und Bestand von Lkw der Sattelzugmaschinen (mehr als 40 t) von 2015 bis 2030 (Simulationsergebnisse) .....	64
Abbildung 34: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Diesel- und Gaspreisvariation .....	68
Abbildung 35: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Zinssatz- und BEV-Batteriekapazitätsvariation .....	69
Abbildung 36: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für Batteriekosten und -lebensdauern .....	70
Abbildung 37: Sensitivitätsrechnungen für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 für verschiedene BZ-Parameter .....	71
Abbildung 38: Vergleich der Rechnungen mit und ohne Energiesteuern für den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 .....	72
Abbildung 39: Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungsgrundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030.....	74
Abbildung 40: Vergleich der Rechnungen verschiedener Emissionsbemessungs-Grundlagen und deren Auswirkungen auf den alternativen Fahrzeugbestand (Lkw) 2030 unter Einbezug von synthetisch erstelltem Methanol.....	75
Abbildung 41: Anteile der verschiedenen alternativen Antriebsarten am alternativen Fahrzeugbestand im Jahr 2030 im Basisszenario unterteilt nach Größenklassen .....	77
Abbildung 42: TCO im Jahr 2030 (Modellergebnisse) .....	80
Abbildung 43: Aufteilung der Betriebskosten im Vergleich .....	84
Abbildung 44: Energiedichten von Kraftstoffen im Vergleich (vgl. IWR 2005) .....	87
Abbildung 45: Mögliche Positionierung des H <sub>2</sub> -Tanks (Bildquelle: Hoepke und Breuer 2013) .....	88
Abbildung 46: Benötigte Leistung von Sattelzügen (vgl. Hoepke und Breuer 2013, S. 58).....	89
Abbildung 47: Anteile der Neuzulassungen von Sattelzugmaschinen nach Motorleistung (KBA 2006, KBA 2014a).....	90

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kennzahlen für Lkw und potentielle strombasierte Antriebstechnologien unterschieden nach Gewichtsklassen .....	8
Tabelle 2:	Übersicht ausgewählter Förderprojekte in Deutschland, Frankreich und in der Europäischen Union (EU) insgesamt .....	32
Tabelle 3:	US-amerikanische Demonstrationsprojekte für mittelschwere BZ-Lkw (CARB 2015-2) .....	33
Tabelle 4:	US-amerikanische Demonstrationsprojekte für schwere BZ-Lkw (CARB 2015-2) .....	33
Tabelle 5:	Staatliche Subventionen für BZ-Pkw und BZ-Busse (IPHE 2015) .....	35
Tabelle 6:	Zusammenfassung der quantitativen und qualitativen Analyse über alle analysierten Länder (plus Korea) hinweg .....	47
Tabelle 7:	CO <sub>2</sub> -Emissionen (WtW) für betrachtete Antriebsarten 2030 .....	56
Tabelle 8:	Preisannahmen für Energieträger und Batterien, Batterielebensdauer und CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung .....	57
Tabelle 9:	Lkw-Bestand (auf Tausender gerundet), EEV-Einsparung, CO <sub>2</sub> -Emissionsminderung im Basisszenario im Jahr 2030, unterschieden nach Größenklassen und Antriebsarten .....	67
Tabelle 10:	Parameter für Dieselfahrzeuge 2015 .....	96
Tabelle 11:	Parameter für Dieselfahrzeuge 2030 .....	96
Tabelle 12:	Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2015 .....	97
Tabelle 13:	Parameter für FCEV-Fahrzeuge 2030 .....	97
Tabelle 14:	Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2015 .....	97
Tabelle 15:	Parameter für CNG/LNG-Fahrzeuge 2030 .....	97
Tabelle 16:	Parameter für BEV-Fahrzeuge 2015 .....	98
Tabelle 17:	Parameter für BEV-Fahrzeuge 2030 .....	98
Tabelle 18:	Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2015 .....	98
Tabelle 19:	Parameter für PHEV-Fahrzeuge 2030 .....	99
Tabelle 20:	Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2015 .....	99
Tabelle 21:	Parameter für Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 2030 .....	99
Tabelle 22:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2015 .....	100
Tabelle 23:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge 2030 .....	100
Tabelle 24:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2015 .....	100
Tabelle 25:	Parameter für Batterie-Hybrid-Fahrzeuge (Stromschiene und induktiv) 2030 .....	101



## Literaturverzeichnis

- Auf der Maur, A.; Rommerskirchen, S.; Strassburg, S. (2015): Aktualisierung des Referenzszenarios für die Einsparpotentiale der Treibhausgas-Emissionen und des Endenergieverbrauchs im Verkehr für die Zeithorizonte 2020 und 2050 – VERTRAULICH. Aktualisierung der Prognoseergebnisse sowie Abschätzung und Bewertung politischer Maßnahmen. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Prognos AG. Basel.
- Auto-Presse (2011): Testfahrt in die Zukunft: Opel setzt auf Wasserstoff, <http://auto-presse.de/autonews.php?newsid=91335>, zuletzt geprüft am 22.08.2016.
- Ball, M. und Wietschel, M. (2009): The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges. Cambridge University Press, New York, USA.
- Ballard 2015: Ballard Power Systems Inc. (2015): News Releases – Ballard Lands \$17M Deal For Deployment of ~300 Fuel Cell Buses in China. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/news09251501.aspx>, zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- BMVI 2016: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Bundesminister Dobrindt stellt Wasserstoffstrategie vor. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2016/043-dobrindt-h2-mobility-kongress.html>
- Bundesregierung (2007): Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung - Herausforderung und energie- und klimapolitische Zielsetzungen, Internet Download: [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Archiv16/Artikel/2007/12/Anlagen/2007-12-05-zusammenfassung-energiepaket.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Archiv16/Artikel/2007/12/Anlagen/2007-12-05-zusammenfassung-energiepaket.pdf?__blob=publicationFile)
- CAEC 2016: California Energy Commission (2016): Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program Proceedings. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.energy.ca.gov/altfuels/index.html>
- CAFCP 2016: California Fuel Cell Partnership (2016): About Us. Online-Ressource unter dem Link: [http://cafc.org/about\\_us#about\\_us\\_mission](http://cafc.org/about_us#about_us_mission), zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- CARB 2012: California Air Resources Board (2012): ARB Mission and Goals. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.arb.ca.gov/html/mission.htm>, zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- CARB 2015-1: California Air Resources Board (2015): Grant Solicitation – Air Quality Improvement Program and Low Carbon Transportation Greenhouse Gas Reduction Fund (GGRF) Investments – Zero-Emission Truck and Bus Pilot Commercial Deployment Projects. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.arb.ca.gov/msprog/aqip/solicitations/msc1524solicit.pdf>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- CARB 2015-2: California Air Resources Board (2015): Draft – Technology Assessment – Medium- and Heavy-Duty Fuel Cell Electric Vehicles. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.arb.ca.gov/msprog/tech/techreport/fc\\_tech\\_report.pdf](http://www.arb.ca.gov/msprog/tech/techreport/fc_tech_report.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- CARB 2015-3: California Air Resources Board (2015): Proposed – Fiscal Year 2015-16 Funding Plan for Low Carbon Transportation Investments and the Air Quality Improvement Program. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.arb.ca.gov/msprog/aqip/fundplan/proposed\\_fy15-16\\_funding\\_plan.pdf](http://www.arb.ca.gov/msprog/aqip/fundplan/proposed_fy15-16_funding_plan.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- CARB 2015-4: California Air Resources Board (2015): Multi-Source Facility Demonstration Project Applications – Fiscal Year 2014-2015. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.arb.ca.gov/msprog/aqip/demo/2014-15\\_msfdemo\\_applications.pdf](http://www.arb.ca.gov/msprog/aqip/demo/2014-15_msfdemo_applications.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016

- CARB 2016-1: California Air Resources Board (2016): Clean Vehicle Rebate Project. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.arb.ca.gov/msprog/aqip/cvrp.htm>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- CARB 2016-2: California Air Resources Board (2016): Cap-and-Trade Program. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.arb.ca.gov/cc/capandtrade/capandtrade.htm>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Clean Technica 2015: Sustainable Enterprises Media, Inc. (2015). Boom! China Adds 333 Fuel Cell Electric Buses. Online-Ressource unter dem Link: <http://cleantechnica.com/2015/09/29/boom-china-adds-333-fuel-cell-electric-buses/>, zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- CTA 2014: Center for Transportation Analysis (CTA), Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (2014): Vehicle Technologies Market Report – Chapter 3 – Heavy Trucks. Online-Ressource unter dem Link: [http://cta.ornl.gov/vtmarketreport/pdf/chapter3\\_heavy\\_trucks.pdf](http://cta.ornl.gov/vtmarketreport/pdf/chapter3_heavy_trucks.pdf), zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- CTE 2016: Center for Transportation and the Environment (cte) (2016): San Pedro Bay Ports Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV) Demonstration Project. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.cte.tv/project/san-pedro-bay-ports-fuel-cell-electric-vehicles-fcev-demonstration-project/>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- CWC 2016: CWC Group Ltd. (2016): CWC LNG Fuels Summit – Dr Manfred Schuckert. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.lngfuelssummit.com/speakers/dr-manfred-schuckert/>, zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- Daily Fusion 2013: DailyFusion.NET (2013). Refrigerator Trucks in Three States to Use Fuel Cells for Cooling. Online-Ressource unter dem Link: <http://dailyfusion.net/2013/08/refrigerator-trucks-in-three-states-to-use-fuel-cells-for-cooling-18144/>, zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- Daimler 2016: Daimler Trucks North America LLC (2016): What's new. Online-Ressource unter dem Link: <https://www.freightlinertrucks.com/>, zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- Daimler AG (2016): Vernetzte Lkw – Mithilfe des Internets zum Warentransport der Zukunft, <https://www.daimler.com/innovation/vernetzung/vernetzte-Lkw.html>
- Daimler AG (2016a): Lkw Komplettlösungen. Online verfügbar unter <https://bb-portal.mercedes-benz.com/bic/index.php?id=index>, zuletzt geprüft am 06.04.2016.
- DLSV 2013: Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258, Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V., März 2013
- DoE 2014: Department of Energy (DoE) (2014): 2013 Fuel Cell Technologies Market Report – Fuel Cell Technologies Office. Online-Ressource unter dem Link: [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/11/f19/fcto\\_2013\\_market\\_report.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/11/f19/fcto_2013_market_report.pdf), zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- DoE 2015: Department of Energy (DoE) (2015): DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. Online-Ressource unter dem Link: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15003\\_industry\\_lift\\_truck\\_deployments.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15003_industry_lift_truck_deployments.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Dünnebeil, Frank; Reinhard, Carsten; Lambrecht, Udo; Kies, Antonius; Hausberger, Stefan; Rexeis, Martin (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgas-minderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Institut für
- DWPI (2016), FIZ Karlsruhe GmbH, Link: [http://www.stn-international.com/dif\\_dwpi.html](http://www.stn-international.com/dif_dwpi.html). Zuletzt abgerufen am 14. September 2016
- Elsevier (2016), Link: <https://www.elsevier.com/solutions/engineering-village/content/compendex>. Zuletzt abgerufen am 14. September 2016
- EnStG 2016: Energiesteuergesetz ([https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/\\_\\_\\_2.html](https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/___2.html))
- erdgas mobil GmbH (2015). Online verfügbar unter <https://www.erdgas-mobil.de/faq/>, zuletzt aktualisiert am 06.04.2016, zuletzt geprüft am 06.04.2016.



- European Patent Organisation (EPA) (2016), Link: <https://www.epo.org/index.html>. Zuletzt abgerufen am 14. September 2016
- EvoBus GmbH (2009): Der Citaro FuelCELL-Hybrid Generation Zero-Emission. [http://www.mercedes-benz.de/content/media\\_library/hq/hq\\_mpc\\_reference\\_site/bus\\_ng/services\\_accessories/brochures/FuEL\\_CELL/fuel\\_cell\\_technical\\_data\\_2009\\_de\\_pdf.object-Single-MEDIA.tmp/MBO09003\\_Citaro\\_FuellCELL-Hybrid\\_DE.pdf](http://www.mercedes-benz.de/content/media_library/hq/hq_mpc_reference_site/bus_ng/services_accessories/brochures/FuEL_CELL/fuel_cell_technical_data_2009_de_pdf.object-Single-MEDIA.tmp/MBO09003_Citaro_FuellCELL-Hybrid_DE.pdf), zuletzt abgerufen: 22.08.2016.
- Expo 2005: IBM Japan, Ltd. (2005): Fuel cell hybrid bus. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.expo2005.or.jp/en/technology/fchv.html>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Fontaras, G.; Rexeis, M.; Hausberger, S.; Kies, A.; Hammer, J.; Schulte, L.-E. et al.(2014): Development of a CO2-Certification and Monitoring Methodology for Heavy Duty Vehicles. Proof of Concept Report. Luxemburg: Europäische Union.
- Globisch, J., Schneider, U., und Dütschke, E. (2013). Acceptance of electric vehicles by commercial users in the electric mobility pilot regions in Germany. In Proceedings of the 2013 ECEEE summer study, Toulon, France.
- Gnann T. (2015): Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure. Stuttgart.
- H2 Mobility 2016: H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co.KG (2016): 6 Partner, ein Ziel: 400 Wasserstoffstationen. Online-Ressource unter dem Link: <http://h2-mobility.de/>, zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Hülsmann, Friederike; Kasten, Peter; Loreck, Charlotte; Ludig, Sylvie et al. (2014): eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Gemeinsamer Endbericht zu den Vorhaben „Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung von Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum langfristigen Klimaschutz (FZK: UM 11 96 106) und „Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität im Güter- und öffentlichen Personenverkehr zum langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: 16 EM 1001). Öko-Institut e.V. (Berlin). Berlin.
- Hacker, Florian; Waldenfels, Rut von; Mottschall, Moritz (2015): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potentialen und möglicher CO2-Minderung im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Abschlussbericht. Aktualisierte Fassung April 2015. Öko-Institut e.V. (Berlin).
- Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA). Version 3.1: INFRAS.
- Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA). Version 3.2: INFRAS.
- Hoepke und Breuer (2013): Nutzfahrzeugtechnik. Springer: Berlin
- Hülsmann, Friederike; Mottschall, Moritz; Hacker, Florian; Kasten, Peter (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potentiale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Working Paper. Öko-Institut e.V. (Berlin).
- hycar 2016: Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung. <http://www.hycar.de/gas.html>, zuletzt geprüft am 22.08.2016.
- IEA 2014: International Energy Agency/Alex Körner (2014): Discussion – Hydrogen roadmap preliminary results & Milestones and key actions. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.iea.org/media/workshops/2014/asiahydrogenworkshop/2.3\\_SessionIIKoernerIEA Preliminaryresultsandmilestonesfordiscussion.pdf](http://www.iea.org/media/workshops/2014/asiahydrogenworkshop/2.3_SessionIIKoernerIEA Preliminaryresultsandmilestonesfordiscussion.pdf), zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- inforoad GmbH: Aktuelle AdBlue Preise – die günstigste Tankstelle in Ihrer Stadt. Online verfügbar unter <http://www.clever-tanken.de/spritpreise/adblue-preise>, zuletzt geprüft am 06.04.2016.
- Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) (2005): Speicherung von Wasserstoff. <http://www.iwr.de/wasserstoff/wasserstoffspeicherung/wasserstoffspeicherung.html>, zuletzt geprüft am 22.08.2016.

- IPHE 2015: International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy/Xiangmin Pan, Tongji University (2015): Country Update China. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.iphe.net/docs/Meetings/SC23/China\\_SC23.pdf](http://www.iphe.net/docs/Meetings/SC23/China_SC23.pdf), zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- IPHE 2016: Ministry of Economy, Trade and Industry/Kohjiro Hara. Ph.D. (2016): Research and Development of Fuel Cells Vehicle and Hydrogen in Japan. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.iphe.net/docs/Meetings/Canada\\_5-11/Japan %20country %20update.pdf](http://www.iphe.net/docs/Meetings/Canada_5-11/Japan_%20country_%20update.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Koalitionsvertrag (2013): Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. Berlin
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2006): Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) Jahr 2006 – FZ26. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD).Inlandsverkehr Jahr 2013 VD3. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014a): Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kfz-Anhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) (FZ 25). Stichtag: 1. Januar 2014. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014b): Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) Jahr 2014 – FZ26. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2015): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Inlandsverkehr Jahr 2014 VD3. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).
- Kreyenberg D.; Lischke, A.; Bergk, F.; Dünnebeil, F.; Heidth, C.; Knörr, W. et al. (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH; Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH. Berlin.
- Kreyenberg, D.; Lischke, A.; Bergk, F.; Dünnebeil, F.; Heidth, C.; Knörr, W. et al. (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr. Potentiale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH; Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH. Berlin.
- Lastauto Omnibus-Katalog 2014 (2013). 1. Aufl. Stuttgart: Motorbuch.
- Lastauto Omnibus-Katalog 2015 (2014). 1. Aufl. Stuttgart: Motorbuch.
- LBST (2016): Hydrogen Filling Stations Worldwide, <http://www.netinform.net/h2/H2Stations/Default.aspx>, zuletzt geprüft am 22.08.2016.
- Lenz, Barbara; Lischke, Andreas; Knitschky, Gunnar; Adolf, Jörg; CEng, Felix Balthasar; Stöver, Jana et al. (2010): Shell Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Shell Deutschland Oil GmbH (Hamburg); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Stuttgart); Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (Hamburg). Hamburg/Berlin.

- McKinsey & Company; BMW AG; Daimler AG; Ford; General Motors LLC; Honda R&D; Hyundai Motor Company; Kia Motors Cooperation; Nissan, Renault, Toyota Motor Corporation; Volkswagen; ENI Refining and Marketing; Galp Energia; OMV Refining and Marketing GmbH; Shell Downstream Services International B.V.; Total Raffinage Marketing; EnBW Baden-Wuerttemberg AG; Vattenfall; Air Liquide; Air Products; The Linde Group; Intelligent Energy Holdings plc; Powertech; Nordex; ELT Elektrolyse Technik; Hydrogenics; Hydrogen Technologies; Proton Energy Systems; European Climate Foundation; European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, NOW GmbH: A Portfolio of Power-Trains for Europe: A Fact-Based Analysis. 2011
- METI 2014: Ministry of Economy, Trade and Industry/Government of Japan (2014). Summary of the Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.meti.go.jp/english/press/2014/pdf/0624\\_04a.pdf](http://www.meti.go.jp/english/press/2014/pdf/0624_04a.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Michaelis, J.; Helms, H.; Noeren, D.; Dallmer-Zerbe, K.; Gnann, T.; Haendel, M.; Reinhard, C.; Marwitz, S. (2015): Energie und Umwelt – Elektromobilität in Baden-Württemberg im Jahr 2030. Projektübergreifende Forschung im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg. Abschlussbericht. Freiburg/Brsg.: Fraunhofer ISE
- Mineralöl-Wirtschaftsverband e.V. (MWW) 2016: Daten und Statistiken <http://www.mwv.de/index.php/daten>, zuletzt geprüft am 22.08.2016.
- MKS 2013: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2013): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Online-Ressource unter dem Link: [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-strategie-final.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-strategie-final.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- MoE 2014: Ministry of the Environment/Government of Japan (2014). Development and Testing of Hydrogen Technology. Online-Ressource unter dem Link: [http://www.env.go.jp/en/earth/cc/jpdindc/tech\\_hydrogen-3.pdf](http://www.env.go.jp/en/earth/cc/jpdindc/tech_hydrogen-3.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- NGV Journal 2015: [www.ngvjournal.com/en/magazines/the-gvr/download/2741/8983/26](http://www.ngvjournal.com/en/magazines/the-gvr/download/2741/8983/26)
- Njumaen: LPG & CNG Tankstellen. Online verfügbar unter <http://www.gas-tankstellen.de/menu.php>, zuletzt geprüft am 02.05.2016.
- NOW 2016: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (NOW) (2016): Über die NOW. Online-Ressource unter dem Link: <https://www.now-gmbh.de/de/ueber-now>, zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- NPE 2014: Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), [https://www.bmbf.de/files/NPE\\_Fortschrittsbericht\\_2014\\_barrierefrei.pdf](https://www.bmbf.de/files/NPE_Fortschrittsbericht_2014_barrierefrei.pdf)
- Nykqvist, B. and Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Clim. Change*, 5(4):329–332.
- Ostertag, K.; Jochem, E.; Schleich, J.; Walz, R.; Kohlhass, M.; Diekmann, J.; Ziesung, H.-J. (2000): *Energiesparen – Klimaschutz, der sich rechnet – Ökonomische Argumente in der Klimapolitik*; Heidelberg: Physica-Verl., 2000).
- Paccar 2016: Paccar Inc. (2016): Get to Know Paccar. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.paccar.com/about-us/get-to-know-paccar/>, zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- Pehnt, M. und Höpfner, U. (2009): Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Heidelberg.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; Wietschel, M.: Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2013, 211 S.

- Power 2014: Access Intelligence, LLC (2014). DOE Fuel Cell Barge Project Launching Prototype. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.powermag.com/doe-fuel-cell-barge-project-launching-prototype/>, zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- Propfe, Bernd; Redelbach, Martin; Santini, Danilo J.; Friedrich, Horst (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. German Aerospace Center (Stuttgart); Argonne National Laboratory, Transportation Technology R&D Center (Argonne). Los Angeles.
- PTJ 2011: Projektträger Jülich (2011): Nationaler Entwicklungsplan – Version 3.0 zum Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP). Online-Ressource unter dem Link: [https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_3373/nationaler\\_entwicklungsplan\\_version\\_3.0\\_nip.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_3373/nationaler_entwicklungsplan_version_3.0_nip.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Repenning et al. 2015: Klimaschutzszenario 2050, 2. Endbericht. Öko-Institut, Fraunhofer ISI, <http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>
- Reuters (2016), Link: <https://apps.webofknowledge.com/>. Zuletzt abgerufen am 14. September 2016
- Reuters 2014: Thomson Reuters Corp. (2014): Japan readies fuel cell subsidies in bet on Toyota's next big thing. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.reuters.com/article/2014/07/23/us-japan-autos-fuelcells-idUSKBN0FS19420140723>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Schade, W.; Wietschel, M. (2016): „Energiepreise für ein Referenzszenario der MKS“ (ARBEITSPAPIER zum Projekt Unterstützung des BMVI bei der Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie)
- Schneider, S. (2014): Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens von Feldschlösschen Getränke AG. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- SINOTRUK 2016: SINOTRUK (Hong Kong) Ltd. (2016): About Us – Corporation Introduction. Online-Ressource unter dem Link: <http://en.sinotruk.com/View/AboutGroup.aspx>, zuletzt abgerufen am 31.03.2016
- SoC 2013: State of California/California Energy Commission (2013): Grant Request Form (GRF). Online-Ressource unter dem Link: [http://www.energy.ca.gov/business\\_meetings/2015\\_packets/2015-07-08/Item\\_14b\\_ARV-15-002\\_Hydrogenics\\_USA\\_Inc.pdf](http://www.energy.ca.gov/business_meetings/2015_packets/2015-07-08/Item_14b_ARV-15-002_Hydrogenics_USA_Inc.pdf), zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Sperling, D. und Kurani, K. S. (1987): „Refueling and the vehicle purchase decision: the die-sel car case,” tech. rep., Transportation Research Group, Departments of Environmental Studies and Civil Engineering, Univ. of California, Davis.
- Statistisches Bundesamt 2015: Anzahl der Tankstellen in Deutschland, <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/>
- Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Wietschel, Martin (2015): Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Karlsruhe.
- Toyota 2014: Toyota Motor Europe S.A./N.V. (2014): TOYOTA powertrain Roadmap Matching technology to usage. Online-Ressource unter dem Link: <http://newsroom.toyota.eu/pressrelease/4003/1299/toyota-powertrain-roadmap-matching-technology-usage>, zuletzt abgerufen am 6.04.2016
- Transport 2015: bestof9: Ein Blick zwischendurch auf die Kühlaggregate. Online-Ressource unter dem Link: <http://www.transport-online.de/Transport-Fachzeitung/Fachartikel/14829/bestof9-eu-Ein-Blick-zwischendurch-auf-die-Kuehlaggregate> zuletzt abgerufen am 07.10.2016
- Truckscout 24 (2013): Stichprobe für gebrauchte Lastkraftwagen, basierend auf [www.truckscout24.de](http://www.truckscout24.de), zuletzt abgerufen 2013.

- UBA (2013): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr, Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes zum Forschungsvorhaben „Verkehr 2050 – Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachten Energie und Emissionsszenarios“, Öko-Institut e.V., Autoren Blanck, R.; Kasten P.; Hacker, F.; Mottschall, M.; Öko-Institut: Berlin
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Öko-Institut e.V., Autoren: Rosemarie Benndorf, Maja Bernicke, Andreas Bertram, Wolfgang Butz, Folke Dettling, Johannes Drotleff, Cornelia Elsner, Eric Fee, Christopher Gabler, Christine Galander, Yvonne Hargita, Reinhard Herbener, Tim Hermann, Fabian Jäger, Judith Kanthak, Hermann Kessler, Yvonne Koch, David Kuntze, Martin Lambrecht, Christian Lehmann, Harry Lehmann, Sandra Leuthold, Benjamin Lünenbürger, Insa Lütkehus, Kerstin Martens, Felix Müller, Klaus Müschen, Diana Nissler, Sebastian Plickert, Katja Purr, Almut Reichart, Jens Reichel, Hanno Salecker, Sven Schneider, Jens Schuberth, Dietrich Schulz, Marlene Sieck, Ulla Streng, Bärbel Westermann, Kathrin Werner, Christine Winde, Dietmar Wunderlich, Brigitte Zietlow
- UBA (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, durchgeführt von Kasten, P.; Mottschall, M., Köppel, W.; Degünther, Ch.;n Schmied, M.; Wüthrich, Ph.. Öko-Institut e.V., DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), INFRAS. Berlin: Öko-Institut
- Wietschel et al. (2016a) – Fachworkshop: „Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Potentiale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs“ (2016). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Berlin). Berlin, 01.03.2016.
- Wietschel et al. (2016b) – Fachworkshop: „Brennstoffzellen-Lkw: Stand der Entwicklung, Marktpotentiale und Forschungsbedarf“. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Berlin). Berlin, 30.05.2016.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, W., Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Rödl, A.; Schade, W., Mader, S. (2017): „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“, Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Stuttgart, Karlsruhe, TU Hamburg-Harburg, Hamburg, M-Five, Karlsruhe, 2017.
- Wöhe, G. und Döring, U. (2002): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21. Auflage, Vahlen Franz GmbH. 2002.
- World Intellectual Property Organization (WIPO) (2016), Link: <http://www.wipo.int/pct/de/>. Zuletzt abgerufen am 14. September 2016
- WSJ 2014: Dow Jones & Company, Inc. (2014): Bankruptcy Beat – Vision Industries Has Ties to Really Cool People. Online-Ressource unter dem Link: <http://blogs.wsj.com/bankruptcy/2014/09/29/vision-industries-has-ties-to-really-cool-people/>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016
- Yokoyama, T. (2009): „Progress & Challenges for Toyota’s Fuel Cell Development,“ 2009 ZEV Symposium, September 21, 2009.
- Yutong 2015: Zhengzhou Yutong Group Co., Ltd. (2015): Yutong’s fuel cell bus project passes the inspection by UN experts. Online-Ressource unter dem Link: <http://en.yutong.com/pressmedia/yutongnews/2015/71752.html>, zuletzt abgerufen am 4.04.2016